



Уральский  
федеральный  
университет

имени первого Президента  
России Б.Н.Ельцина

Физико-  
технологический  
институт

**В. Л. ПЕТРОВ**

# МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕЛЯЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ

Лабораторный практикум



Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации  
Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

**В. Л. Петров**

# МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕЛЯЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ

.....

Лабораторный практикум

Рекомендовано методическим советом  
Уральского федерального университета  
для студентов вуза, обучающихся  
по направлению подготовки 14.05.04 «Электроника  
и автоматика физических установок»

*2-е издание, исправленное*

Екатеринбург  
Издательство Уральского университета  
2019

УДК 621.039.76(076.5)

ББК 31.42я73-5

ПЗ0

Рецензенты: канд. техн. наук *А. В. Васильев* (заведующий радиационной лабораторией Института промышленной экологии УрО РАН); канд. техн. наук *М. Н. Благовещенский* (начальник конструкторского отдела ООО «ГАММА»)

Научный редактор — д-р физ.-мат. наук, проф. *Б. В. Шульгин*

**Петров, В. Л.**

ПЗ0 Методы и средства обнаружения делящихся материалов : лабораторный практикум / В.Л. Петров. — 2-е изд., исправл. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019. — 96 с.

ISBN 978-5-7996-2606-8

В практикуме приведены подробные сведения об алгоритмах поиска и обнаружения источников ионизирующих излучений, характеристиках детекторов и блоках детектирования гамма- и нейтронного излучений, методах измерения основных технических характеристик блоков детектирования. Содержится описание устройства, особенностей эксплуатации и методов решения задач обнаружения и идентификации радионуклидов комплексами радиационного контроля «Соратник-01».

ISBN 978-5-7996-2606-8

© Уральский федеральный университет, 2017

© Уральский федеральный университет, 2019,  
с изменениями

© Петров В.Л., 2019

---

## Условные обозначения

---

|      |   |
|------|---|
| БД   | — база данных   |
| БДО  | — база данных объектов                                      |
| БДРМ | — база данных радиационного мониторинга                     |
| ВГС  | — выносной гамма-спектрометр                                |
| ВП   | — военная приемка   |
| ГСИ  | — Государственная система обеспечения единства измерений    |
| ДИН  | — детекторы нейтронного излучения                           |
| ДМ   | — делящийся материал  |
| ЖРБ  | — журнал радиационной безопасности                          |
| ЗТМ  | — ФГУП «Завод точной механики»                              |
| ИИ   | — ионизирующее излучение                                    |
| ИИИ  | — источник ионизирующих излучений                           |
| ИОК  | — индикатор оперативного контроля                           |
| ИУП  | — интерактивное учебное пособие                             |
| КУНГ | — кузов универсальный негерметизированный                   |
| МРЗУ | — модуль (блок) энергонезависимого запоминающего устройства |
| МЭД  | — мощность эквивалентной дозы гамма-излучения               |
| НТД  | — научно-техническая документация                           |
| ОСГИ | — образцовые спектрометрические гамма-источники             |
| ОТХ  | — основные технические характеристики                       |
| ПЗ   | — представитель заказчика                                   |

|       |   |
|-------|---|
| ПО    | — программное обеспечение                                 |
| ПП    | — плотность потока (частиц)                               |
| ППО   | — прикладное программное обеспечение                      |
| ПЭВМ  | — персональная электронно-вычислительная машина           |
| РАО   | — радиоактивные отходы                                    |
| РВ    | — радиоактивные вещества                                  |
| РК    | — радиационный контроль                                   |
| РКГ   | — комплекс радиационного контроля гражданского назначения |
| РМ    | — радиационный мониторинг                                 |
| РО    | — руководство оператора                                   |
| РЭ    | — руководство по эксплуатации                             |
| СНС   | — спутниковая навигационная система                       |
| СИ    | — средства измерений                                      |
| СКО   | — среднеквадратическое отклонение                         |
| СкГД  | — сканирующий гамма-детектор                              |
| СРК   | — комплекс специального радиационного контроля            |
| СГК   | — спектрометрический гамма-канал                          |
| ТУ    | — технические условия                                     |
| УНИИМ | — Уральский НИИ метрологии                                |
| УПО   | — учебное программное обеспечение                         |
| ЭК    | — экранирующий конус                                      |

---

# Лабораторная работа № 1

## Алгоритмы поиска и обнаружения источников ионизирующих излучений

---

### Введение

В настоящей лабораторной работе описаны алгоритмы (способы) поиска и обнаружения источников ионизирующих излучений (ИИИ), положенные в основу той части прикладного ПО «Соратник-01», с помощью которой выполняется обработка результатов измерений и решение задачи обнаружения.

Работа состоит из двух частей: теоретической (пп. 1–6) и практической (п. 7). Теоретическая часть посвящена изучению оптимальных алгоритмов обнаружения источников ИИ. Алгоритмы описываются последовательно: сначала кратко изложены теоретические основы построения оптимальных алгоритмов обнаружения; далее рассмотрен простейший случай обнаружения неподвижного объекта контроля при неподвижном комплексе РК; затем последовательно описываются более сложные задачи для «подвижных» случаев, т. е. подвижны либо объект контроля, либо комплекс РК, либо и тот и другой. (Алгоритмы для комплекса «Соратник-01» разработаны и запатен-

тованы авторским коллективом сотрудников кафедры экспериментальной физики<sup>1</sup>).

Практическая часть настоящей лабораторной работы, описанная в п. 7, позволяет закрепить полученные теоретические знания. Суть п. 7 заключается в имитации процедуры обнаружения ИИИ, выполняемой в реальной рабочей обстановке. Для выполнения работы используется тренажер-имитатор учебного программного обеспечения УПО-01 и реальное рабочее прикладное ПО комплекса «Соратник-01», в которое встроены программы, имитирующие (моделирующие) сигналы от детекторов комплекса. Параметры сигнала задаются преподавателем. Параметры «обнаружителя» устанавливаются студентами в ходе работы.

## 1. Теоретические основы разработки оптимальных алгоритмов обнаружения

### 1.1. Постановка задачи

При помощи комплекса РК, содержащего *счетные* детекторы гамма- и (или) нейтронного излучения, необходимо обнаружить источник ИИ с очень малой суммарной активностью.

Поскольку измерения проводятся в условиях естественного фоновое излучения, имеющего, как правило, далеко не нулевой, довольно заметный уровень, то очевидна необходимость

---

<sup>1</sup> Пат. 2140660 Российская Федерация, МПК G01T 1/167. Способ обнаружения слабых потоков ионизирующих излучений / Викторов Л. В., Кружалов А. В., Шеин А. С., Шульгин Б. В., Шульгин Д. Б. № 98102583. Заявл. 10.02.1998; опубл. 27.10.1999, Бюл. № 17; Пат. 2242024 Российская Федерация, МПК G01T 1/169. Способ поиска и обнаружения источников ионизирующих излучений / Викторов Л. В., Ивановских К. В., Лазарев Ю. Г., Петров В. Л., Шеин А. С., Шульгин Б. В. № 2003119905. Заявл. 30.06.2003; опубл. 10.12.2004, Бюл. № 3; Пат. 2456638 Российская Федерация, МПК G01T 1/169. Способ поиска и обнаружения источников ионизирующих излучений / Шеин А. С., Викторов Л. В., Кунцевич Г. А., Петров В. Л., Шульгин Б. В. Заявл. 29.03.2011; опубл. 20.07.2012, Бюл. № 20.



разработки и применения оптимальных алгоритмов обнаружения, т.е. алгоритмов, обеспечивающих максимальный положительный эффект.

Упомянутые алгоритмы базируются на теории обнаружения, которая в свою очередь основана на классических разделах математики: теории вероятности и теории статистических гипотез. (Следует отдельно отметить, что теория обнаружения подробно разработана еще в 30-е годы прошлого века применительно к задачам радиолокации<sup>1</sup>.)

## 1.2. Основные понятия из теории вероятностей, используемые для создания алгоритмов обнаружения

Известно, что сигнал на выходе счетного детектора ИИ — скорость счета импульсов  $n$  ( $1/c$ ) — является случайной величиной, которая описывается статистикой Пуассона (пуассоновским распределением):

$$P(k) = \frac{\lambda^k \cdot e^{-\lambda}}{k!}, \quad (1.1)$$

где  $P(k)$  — вероятность того, что случайная величина  $n$  примет определенное целочисленное значение ( $k = 0, 1, 2, 3, \dots \infty$ );  $\lambda$  — параметр закона Пуассона (равен математическому ожиданию  $\lambda = \bar{n}$ ).

Замечательным свойством пуассоновского закона (1.1) является то, что параметр  $\lambda$  равен дисперсии  $\lambda = D$ , и соответственно, среднеквадратическое отклонение (СКО)  $\sigma = \sqrt{\lambda}$ .

С увеличением параметра  $\lambda$  распределение Пуассона становится близким к нормальному (гауссову), что видно из рис. 1.1.

---

<sup>1</sup> Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т. 1. М.: Сов. Радио, 1972. 744 с.; Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М.: Радио и связь, 1982. 624 с.; Теория обнаружения сигналов / П.С. Акимов, П.А. Бакут, В.А. Богданович [и др.]. М.: Радио и связь, 1982. 440 с.; Закс Ш. Теория статистических выводов. М.: Мир, 1975. 776 с.

При  $\lambda > 50$  совпадение распределения Пуассона с нормальным становится почти идеальным (погрешность менее 0,5 %).

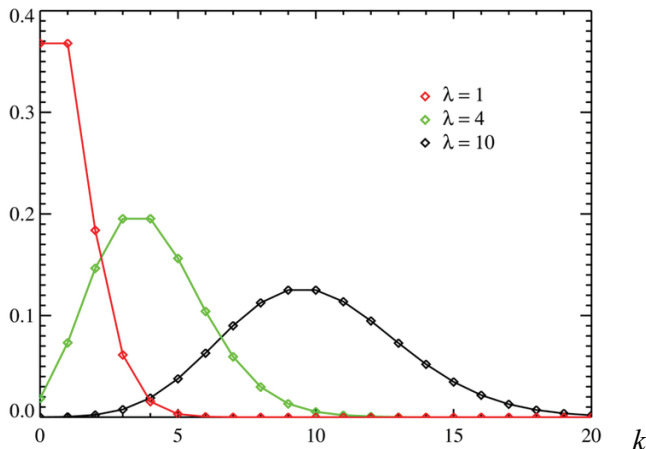


Рис. 1.1. Распределение Пуассона  $P(k)$

Если некоторую случайную величину  $x_{\text{абс}}$  представлять в относительной форме  $x = x_{\text{абс}}/\sigma$ , то вид нормального распределения для такой случайной величины сильно упростится:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2}}. \quad (1.2)$$

Можно сформулировать иначе: формула (1.2) представляет собой нормальное распределение с СКО  $= \sigma = 1$  и средним значением случайной величины, равным  $\bar{x}$ .

Удобство использования нормального распределения в виде (1.2) при  $\bar{x} = 0$  заключается в том, что пороги обнаружения случайной величины  $x$  (называемые квантилями нормального распределения) можно легко подбирать из справочников по теории вероятностей (например, Вентцель Е. С.). Так, квантилю  $q = x = 1,64$  соответствует вероятность превышения  $x \geq 1,64$ , равная 5,0 %.

## 2. Основные термины и понятия, используемые при создании алгоритмов обнаружения

Задача обнаружения источника ИИ сводится к тому, чтобы на основе анализа результатов измерений уровня детектируемого излучения (точнее — скорости счета на выходе детекторов) дать ответ на вопрос о наличии источника ИИ на объекте контроля либо о его отсутствии, причем с заданными вероятностями ошибок. Эта задача относится к группе простых бинарных задач в условиях априорной неопределенности (т.е. когда перед проведением инспекционного контроля объекта нет информации не только о наличии либо отсутствии источника, но и о величине сигнала, создаваемого источником в детекторе).

В результате решения упомянутой задачи возможен один из четырех исходов; соответствующие общепринятые названия исходов и их вероятностей удобно представить в виде табл. 1.1.

Таблица 1.1

**Термины и обозначения, используемые в теории обнаружения**

| Описание исхода при решении задачи обнаружения | Вероятность исхода решения задачи обнаружения                                 |                         |
|--|---|-------------------------|
|  | Наименование  | Обозначение             |
| Верна $H_0$ , выбираем $H_0$                   | Вероятность правильного необнаружения   | $P_o = (1 - \alpha)$    |
| Верна $H_0$ , выбираем $H_1$                   | Вероятность ложной тревоги (ошибка первого рода, уровень значимости критерия) | $P_{лт} = \alpha$       |
| Верна $H_1$ , выбираем $H_1$                   | Вероятность обнаружения (мощность критерия)                                   | $P_{обн} = (1 - \beta)$ |
| Верна $H_1$ , выбираем $H_0$                   | Вероятность пропуска (ошибка второго рода)                                    | $\beta$                 |

В табл. 1.1 приняты следующие обозначения:

$H_0$  — гипотеза об отсутствии источника на объекте контроля;

$H_1$  — гипотеза о наличии источника на объекте контроля.

В теории обнаружения<sup>1</sup> известны несколько оптимальных алгоритмов обнаружения (или правил принятия решения), из которых наиболее часто применяются алгоритмы, основанные на критерии Байеса, когда минимизируется суммарная ошибка ( $\alpha + \beta$ ), либо Неймана — Пирсона. По критерию Неймана — Пирсона при заданной ошибке  $\alpha$  минимизируется  $\beta$ , что приводит к выбору решения с наибольшей мощностью критерия  $P_{\text{обн}} = (1 - \beta)$ . Поэтому критерий Неймана — Пирсона называют наиболее мощным критерием. Выбор того или иного критерия обнаружения зависит от исходных условий постановки задачи.

### 3. Алгоритм обнаружения в режиме «Неподвижный»

Ниже рассмотрен простейший случай, когда и объект контроля, и комплекс РК неподвижны (ситуация контрольно-пускового пункта).

Результатами физических измерений, проводимых с помощью комплекса РК, являются:

- средняя скорость счета фонового потока частиц (квантов)  $\bar{b} = B/t_b$ , где  $B$  — количество импульсов на выходе детектора, зарегистрированных за время измерения фона  $t_b$ ;
- средняя скорость счета при наличии контролируемого объекта в поле наблюдения детекторов  $\bar{n} = N/t_n$ , где  $N$  — количество импульсов за время контроля объекта  $t_n$ .

Разность  $\bar{a} = (\bar{n} - \bar{b})$ , называемая *сигналом* (т.е. фактически измеряемая детектором средняя скорость счета при кон-

<sup>1</sup> Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. 744 с.; Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. 624 с.; Теория обнаружения сигналов. 440 с.; Закс Ш. Теория статистических выводов. 776 с.

троле объекта за вычетом фона), несет информацию о наличии либо отсутствии излучения на объекте контроля. Поскольку, как уже отмечено выше, значения  $\bar{n}$  и  $\bar{b}$  распределены по нормальному закону, то и сигнал  $\bar{a}$  является случайной величиной, распределенной по нормальному закону.

### 3.1. Основные формулы алгоритма обнаружения

Как следует из теории<sup>1</sup>, для решения задачи обнаружения используется *критерий отношения правдоподобия*. Эквивалентным использованием упомянутого критерия (в строго математическом аспекте) является вычисление так называемой *достаточной статистики*:

$$\eta = \frac{\bar{a}^*}{\sqrt{D\{\bar{a}^*\}}}, \quad (1.3)$$

где  $\bar{a}^*$  — оценка максимального правдоподобия параметра  $\bar{a}$ ;

$D\{\bar{a}^*\}$  — дисперсия указанной оценки  $\bar{a}^*$ .

Для пуассоновского закона распределения случайных величин  $\bar{b}$  и  $\bar{n}$  формула (1.1) принимает следующий вид:

$$\eta = \frac{\bar{n} - \bar{b}}{\sqrt{\frac{\bar{n}}{t_n} + \frac{\bar{b}}{t_b}}} \quad (1.4)$$

Очевидно, что статистика  $\eta$ , как и сигнал  $\bar{a}$ , является случайной величиной. Причем из всего сказанного выше следует, что  $\eta$  распределена по нормальному закону в форме (1.2), а СКО величины  $\eta$  равно единице.

<sup>1</sup> Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. 744 с.; Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. 624 с.; Теория обнаружения сигналов. 440 с.

*Решающее правило* (или заключительный этап решения задачи обнаружения) сводится к сравнению статистики  $\eta$  с порогом  $q_0$ :

$$\eta < q_0 \text{ или } \eta \geq q_0. \quad (1.5)$$

При  $\eta < q_0$  принимается гипотеза  $H_0$  об отсутствии источника на объекте контроля. При  $\eta \geq q_0$  принимается противоположная гипотеза  $H_1$  о наличии источника на объекте контроля.

Порог  $q_0$  вычисляется по тем или иным правилам в зависимости от выбранного критерия обнаружения — критерия Байеса или критерия Неймана — Пирсона. Для формирования порога  $q_0$  по критерию Байеса необходима априорная информация о статистических характеристиках сигнала, а именно о среднем значении сигнала  $\bar{a}$ . Однако до завершения процедуры измерений (первой серии измерений) ничего о характеристиках сигнала (и о его наличии либо отсутствии) не известно. Это утверждение, несмотря на очевидность и кажущуюся простоту, является одним из ключевых для логики построения оптимального алгоритма обнаружения. Из него следует, что для решения задачи обнаружения применительно к комплексу РК *критерием Байеса воспользоваться невозможно*. (Имеется в виду, что невозможно именно в режиме online. Апостериорно, при повторной обработке результатов измерений, этот критерий Байеса, конечно, использовать вполне возможно.)

Итак, для решения задачи обнаружения в условиях априорной неопределенности наиболее широкое распространение получил критерий Неймана — Пирсона<sup>1</sup>. Его называют наиболее мощным критерием, т. е. его использование позволяет получить максимальную величину (мощность) вероятности обнаружения  $P_{\text{обн}} = (1 - \beta)$  (или в терминах математики: «позволяет минимизировать ошибку второго рода  $\beta$  при заданной вероятности ложных тревог или уровне значимости  $\alpha$ »).

<sup>1</sup> Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. 744 с.; Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. 624 с.

Для пояснения физического смысла параметра «достаточная статистика»  $\eta$  на рис. 1.2 показаны кривые плотности распределения статистики  $f(\eta)$  для трех случаев:  $f_0(\eta)$  — сигнал отсутствует;  $f_1(\eta)$  — уровень сигнала  $\bar{a}_1$  равен порогу обнаружения  $q_\alpha$ ;  $f_2(\eta)$  — уровень сигнала  $\bar{a}_2$  соответствует вероятности обнаружения  $P_{\text{обн}} = 95\%$ . Плотности распределения на рис. 1.2 представляют собой нормальные распределения с дисперсией, равной единице, и математическим ожиданием  $M\{\eta\}$ , зависящим от среднего значения сигнала  $\bar{a}$ . Математическое ожидание статистики  $\eta$  равно нулю в случае отсутствия источника при постоянном фоне.

Ось абсцисс на рис. 1.2 проградуирована в значениях среднеквадратического отклонения статистики  $\sigma\{\eta\}$  (при  $\sigma\{\eta\} = 1$  указанные значения называют квантилями нормального распределения). Показаны порог  $q_0 = q_\alpha$ , устанавливаемый по задаваемой оператором ошибке 1-го рода  $\alpha$ , и значение  $q_\beta$ , по которому вычисляется полученное в результате контроля значение ошибки 2-го рода  $\beta$  (выделено штриховкой).

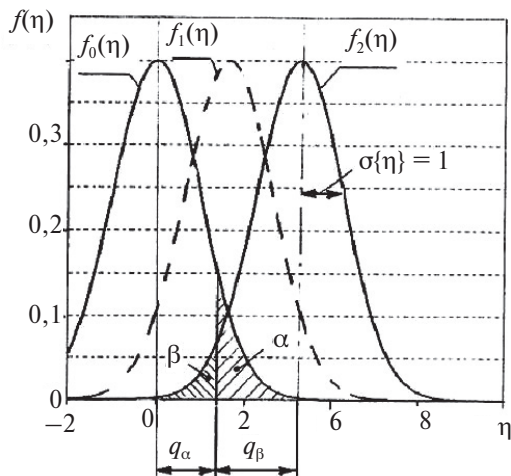


Рис. 1.2. Плотности распределения статистики  $f(\eta)$  при различных уровнях сигнала

### 3.2. Рабочие формулы, используемые для подготовки реальных и (или) модельных экспериментов

Из основных формул (1.4) и (1.5) несложно вывести формулу для минимального значения сигнала  $\bar{a}_{\min}$ , регистрируемого аппаратурой при заданных условиях обнаружения:

$$a_{\min} = \frac{q_p^2}{2 \cdot t_n} + q_p \cdot \sqrt{\frac{q_p^2}{4 \cdot t_n^2} + \bar{b} \cdot \left(\frac{1}{t_n} + \frac{1}{t_b}\right)}, \quad (1.6)$$

где  $q_p = q_\alpha \cdot K_f + q_\beta$  — расчетное значение порога обнаружения, выраженное в квантилях нормального распределения;

$q_\alpha$  и  $q_\beta$  — квантили нормального распределения, соответствующие вероятностям ошибок обнаружения  $\alpha$  и  $\beta$ ;

$K_f$  — коэффициент коррекции порога для учета флуктуаций фона (подробней про  $K_f$  — в п. 3).

Поскольку при измерениях вблизи  $a_{\min}$  отношение «сигнал/фон» очень мало ( $s = a/b < 0,1$ ), а время измерения  $t_n$  обычно не менее 100 с, то формула (1.4) может быть существенно упрощена:

$$a_{\min} \cong q_p \cdot \sqrt{\bar{b} \cdot \left(\frac{1}{t_n} + \frac{1}{t_b}\right)}. \quad (1.7)$$

По известному минимальному обнаруживаемому значению сигнала  $\bar{a}_{\min}$  легко вычислить *ОТХ комплекса РК* — минимальную обнаруживаемую плотность потока нейтронов или гамма-квантов:

$$\Phi_{\min} = \frac{a_{\min}}{\text{Эф}}, \quad (1.8)$$

где Эф — эффективность регистрации детектора (или суммарная эффективность детекторов комплекса РК).



## 4. Алгоритм обнаружения в режиме «Подвижный»

Сначала целесообразно рассмотреть случай, когда объект контроля с обнаруживаемым источником ИИ (или без него) движется относительно неподвижного комплекса РК.

### 4.1. Форма сигнала на выходе счетного детектора в режиме «Подвижный»

Априорное знание формы сигнала является одним из важнейших условий построения оптимального обнаружителя. В источниках<sup>1</sup> подробно рассмотрена возможность использования известных в радиотехнике методов *оптимальной фильтрации*, основанных на согласовании импульсной характеристики тракта регистрации с формой принимаемого сигнала и позволяющих достичь максимально возможного отношения «сигнал/шум». Однако экспертный анализ показал нецелесообразность использования строго оптимальных фильтров в разрабатываемых для комплекса РК алгоритмах ввиду большой погрешности априорной информации о конкретных параметрах сигнала. Поэтому для практической реализации алгоритмов обработки сигнала для комплекса РК сочтено целесообразным применение так называемого квазиоптимального фильтра — интегратора<sup>2</sup>, характерное время интегрирования которого равно *эффективной длительности сигнала*  $t_e$ . Используемый квазиоптимальный фильтр фактически обладает импульсной характеристикой, имеющей форму прямоугольного импульса длительностью  $t_e$ .

Аналитическое выражение, описывающее форму сигнала на выходе счетного детектора от подвижного источника ИИ, выводится из простых геометрических соотношений, осно-

---

<sup>1</sup> Теория обнаружения сигналов. 440 с.; Лезин Ю. С. Оптимальные фильтры и накопители импульсных сигналов. М. : Сов. радио, 1963. 278 с.

<sup>2</sup> Лезин Ю. С. Оптимальные фильтры и накопители импульсных сигналов. 278 с.

ванных на известной зависимости интенсивности излучения от расстояния<sup>1</sup>. Исходя из предположения о равномерном прямолинейном движении источника ИИ по линии, параллельной плоскости чувствительной поверхности плоского детектора, форму сигнала, регистрируемого детектором, можно представить выражением:

$$a(t) = \frac{a_0}{\sqrt{(1 + (t \cdot v_0 / r_0)^2)^3}} = \frac{a_0}{\sqrt{(1 + x^2(t))^3}}, \quad (1.9)$$

где  $v_0$  — относительная скорость перемещения источника ИИ и комплекса;

$r_0$  — расстояние между линией движения источника ИИ и плоскостью чувствительной поверхности детектора (детекторов);

$a_0$  — скорость счета при  $t = 0$ ;

$x(t) = t \cdot v_0 / r_0$  — безразмерный параметр движения, введенный для удобства дальнейшего анализа.

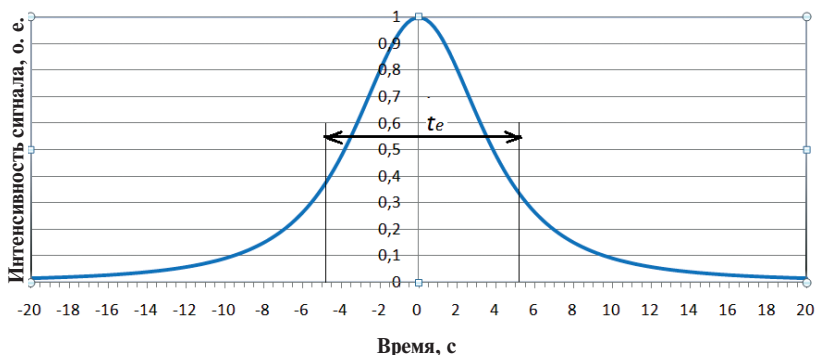


Рис. 1.3. Форма сигнала на выходе плоского детектора для  $t_e = 10$  с (кривая построена по формуле (7) средствами Excel)

<sup>1</sup> Викторов Л. В., Шеин А. С., Петров В. Л. Алгоритмы поиска и обнаружения источников ионизирующих излучений // Проблемы спектрометрии и спектроскопии: межвузовский сборник научных трудов. Екатеринбург : УГТУ, 2008. Вып. 25. С. 146–160.

Полученное выражение (1.9) позволяет, используя известные математические приемы<sup>1</sup>, решить задачу оптимизации величины эффективной длительности сигнала  $t_e$ , приводящей к соотношению

$$(t_e)_{\text{optim}} = 2 r_o / v_o. \quad (1.10)$$

Именно значение (1.10) параметра квазиоптимального фильтра с прямоугольной импульсной характеристикой и используется в алгоритме обнаружения подвижного источника. Упомянутый квазиоптимальный фильтр реализуется в алгоритме обнаружения как скользящий по оси времени интеграл, описанный ниже.

#### 4.2. Алгоритм обнаружения подвижного источника ИИ с помощью неподвижного комплекса РК

Внешне (т. е. для оператора) алгоритм обнаружения подвижного источника похож на описанный выше алгоритм обнаружения неподвижного источника ИИ. Однако в данном случае главной особенностью процедуры обработки регистрируемого сигнала, осуществляемой средствами программного обеспечения, является применение так называемого скользящего по оси времени интеграла. Последнее означает, что начиная с момента «Старт» вычисляется среднее значение  $n_j(t)$  по временному окну  $t_e$ ; далее с тактом  $\Delta t$  (в нашем случае  $\Delta t = 1$  с) это окно интегрирования сдвигается, и снова вычисляется  $n_j(t)$  по формуле

$$\bar{n} = \frac{\int_0^{t_e} n(t) dt}{t_e}, \quad (1.11)$$

и т. д. вплоть до появления команды «Стоп».

Собственно алгоритм обнаружения подвижного источника ИИ с помощью неподвижного комплекса РК сводится к следующей последовательности операций.

<sup>1</sup> Теория обнаружения сигналов. 440 с.; Лезин Ю. С. Оптимальные фильтры и накопители импульсных сигналов. 278 с.; Викторов Л. В., Шеин А. С., Петров В. Л. Алгоритмы поиска и обнаружения источников ионизирующих излучений. С. 146–160.

### A1. Исходные установки и операции.

После включения и тестирования аппаратуры оператор вводит исходные параметры движения объекта контроля: расстояние  $r_o$ , ожидаемую скорость  $v_o$ , параметры обнаружения ( $P_{\text{ЛТ}}$ , критерий обнаружения — Неймана — Пирсона), если требуется — служебную информацию (в виде комментариев) об объекте и условиях контроля. В режиме ожидания объекта контроля осуществляются непрерывные измерения фона. Результаты измерения среднего значения скорости счета фона  $\bar{b}$  (среднего за последние заданные интервалы  $t_b = 5\text{--}15$  мин) индицируются на дисплее.

A2. По сигналу «Старт» измерения фона прекращаются, в базе данных фиксируется значение  $\bar{b}$ , усредненное по измерениям за последний интервал  $t_b$  до момента «Старт».

A3. Регистрируются текущие значения скорости счета аддитивной смеси предполагаемого сигнала и фона  $n(t) = a(t) + b(t)$  с дискретом  $\Delta t$ .

A5. По истечении времени  $t_e$  проводятся вычисления средней скорости счета  $\bar{n}$  за время  $t_e$  по формуле (1.11).

A6. Вычисляется значение статистики  $\eta_1$  по основной формуле (1.2); причем вместо времени наблюдения объекта  $t_n$  в (1.2) подставляется эффективное время  $t_e$ .

A7. По мере движения объекта контроля вычисляются значения средней скорости счета  $\bar{n}_j$  по (1.11). Причем всего вычисляется  $j_{\text{max}}$  значений;  $j_{\text{max}}$  равно целочисленной величине разности  $j_{\text{max}} = (t_s - t_e)$ . В общем случае  $j_{\text{max}}$  может быть довольно большим и зависит от упомянутых выше «оперативных условий» измерения. По полученным  $\bar{n}_j$  вычисляются значения статистики  $\eta_j$  с тактом  $\Delta t$ , как в (A6).

A8. По сигналу «Стоп» регистрация  $n(t)$  прекращается.

Очевидно, что в рассматриваемом случае длительность интервала наблюдения  $t_s$  должна быть несколько больше, чем эффективная длительность сигнала  $t_e$ , поскольку оператор должен

подать команду «Старт» с так называемым упреждением, чтобы потери зарегистрированного интегрального уровня движущегося сигнала свести к минимуму. Команду «Стоп» оператор также должен подать несколько позже момента выхода объекта из зоны контроля. Заметим, что упомянутые упреждение и запаздывание могут быть сравнительно большими и зависят от конкретных условий инспекции. В пределе значение  $t_s$  может в несколько раз превышать эффективную длительность сигнала  $t_e$  (такой случай соответствует контролю протяженного объекта, например вагонов поезда).

А9. Определяется максимальное значение  $(\eta_j)_{\max}$  на интервале  $t_s$ , и далее для найденного значения  $(\eta_j)_{\max}$  по решающему правилу (1.3) принимается одна из гипотез о наличии либо отсутствии источника на объекте контроля.

#### **4.3. Алгоритм обнаружения подвижного источника ИИ с помощью подвижного комплекса РК**

С чисто теоретической точки зрения случай, при котором комплекс РК движется, а «объект контроля» с источником неподвижен, абсолютно эквивалентен первому случаю с подвижным источником ИИ и неподвижным комплексом. Однако при практической реализации между указанными режимами выявляется существенное различие, обусловленное особенностями флуктуаций регистрируемого уровня фона при движении комплекса РК, подробнее рассмотренное ниже, в п. 6.

Тем не менее следует отметить, что если характеристики пространственных флуктуаций фона не отличаются от его временных флуктуаций, то для подвижного комплекса РК вполне пригоден и прекрасно работает алгоритм обнаружения, описанный выше для случая неподвижного комплекса РК и движущегося объекта контроля. (Причем в рассматриваемом случае не имеет значения, движется ли объект контроля; важно всегда использовать не абсолютную скорость движения комплекса РК, а относительную.)

Такие условия соблюдаются, например, на море в случаях использования комплекса РК, смонтированного на вертолете, при проведении радиационного контроля кораблей. Описанный случай приведен на рис. 1.4, для которого использованы данные из реального измерения излучения на выходе нейтронного канала, состоящего из трех детекторов ДИН-02, когда уровень фона составлял  $\bar{b} = 19,5 \text{ с}^{-1}$ , эффективная длительность сигнала  $t_e = 32 \text{ с}$ , амплитуда сигнала  $a_0 = 4,1 \text{ с}^{-1}$ , что соответствует вероятности обнаружения 95,5 %. Очевидно, что по графику  $n(t)$  ни факта наличия сигнала, ни положения «центроиды»  $t_m$  слабого сигнала визуально не видно. Наличие сигнала выявляется только после обработки средствами ПО измеренной  $n(t)$  по факту превышения значений статистики  $\eta(t)$  порогового уровня  $q_0$ .

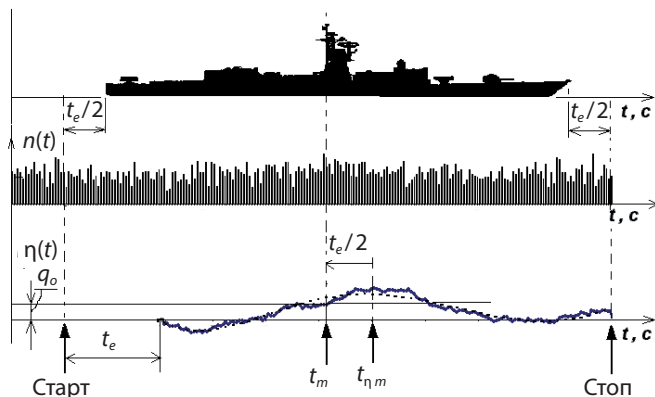


Рис. 1.4. Контроль наличия источника ИИ на корабле при помощи вертолетного комплекса РК

#### 4.4. О флуктуациях фона и особенностях методики измерения фона

Из приведенных в пп. 1, 2 соотношений видно, что именно в сравнении характеристик излучения от объекта контроля с фоном (измеренным заранее или после завершения проце-

дуры контроля объекта) и заключается главная специфика используемых в комплексе РК алгоритмов обнаружения источника ИИ. Поэтому для успешного решения задачи обнаружения ключевыми исходными данными являются данные о реальных статистических характеристиках флуктуаций фона.

Безусловно, в идеале хотелось бы, чтобы фон можно было считать *эргодическим случайным процессом*, т. е. чтобы его статистические характеристики не зависели ни от времени, ни от пространственных изменений точки наблюдения. Однако, к сожалению, как показывает практика, это не так, что заставляет внимательно прорабатывать методики и алгоритмы обнаружения слабых источников, причем, как будет показано ниже, учитывать и зависимость от вида излучения. (Следует отметить, что фон от нейтронного излучения, в отличие от гамма-излучения, может считаться эргодическим случайным процессом. Об этом подробнее ниже.)

## 5. Учет реальных характеристик флуктуаций фона в алгоритмах обнаружения

В источниках<sup>1</sup> подробно описаны результаты исследований статистических характеристик флуктуаций нейтронного и гамма-фона. Исследования выполнены на основе как анализа ли-

<sup>1</sup> Викторов Л. В., Могильникова Ю. А. Вариации нейтронного поля Земли // Проблемы спектрометрии и спектроскопии: межвузовский сборник научных трудов. Екатеринбург : УГТУ, 2000. С. 95; Викторов Л. В., Андреев В. С., Петров В. Л. Исследования статистических характеристик флуктуаций гамма- и нейтронного фона // Проблемы спектрометрии и спектроскопии: межвузовский сборник научных трудов. Екатеринбург : УГТУ, 2002. Вып. 10. С. 10; Статистические характеристики флуктуаций гамма- и нейтронного фона / В. С. Андреев [и др.] // Проблемы прикладной спектроскопии и радиометрии : тезисы докладов на VI Международном совещании. М. : ВНИИФТРИ, 2002. С. 32; Перцов Л. А. Природная радиоактивность биосферы. М. : Атомиздат, 1965. 316 с.; Кузин А. М. Природный радиоактивный фон и его значение для биосферы земли. М. : Наука, 1991. 117 с.

тературных данных, так и обработки результатов измерений, полученных авторами с помощью аппаратуры комплексов радиационного контроля «Советник» и «Соратник».

Главные выводы из упомянутых исследований, важные для разработки прикладных алгоритмов обнаружения:

1. Согласно обобщениям<sup>1</sup>, можно утверждать, что вклад нейтронной составляющей космического излучения велик и практически полностью определяет нейтронный фон вблизи поверхности Земли.

Появление в биосфере нейтронов космического происхождения объясняется процессом взаимодействия космических частиц высоких энергий с ядрами атомов вещества атмосферы и образованием вследствие этого широких атмосферных ливней. Наиболее значительное образование нейтронов космическими лучами происходит на больших высотах. По мере приближения к поверхности Земли число нейтронообразующих частиц в составе космических лучей заметно убывает, поэтому поток вторичных нейтронов уменьшается до сотых долей процента от потока на максимальной высоте.

Высказано предположение о том, что в общем потоке нейтронных частиц присутствует и небольшая доля нейтронов первичного происхождения, приходящих на земную поверхность из области солнечной атмосферы. Однако, несмотря на то что земной поверхности достигает лишь небольшая часть вторичных нейтронов, образующихся в верхних слоях атмосферы, их ин-

---

<sup>1</sup> Викторов Л. В., Могильникова Ю. А. Вариации нейтронного поля Земли. С. 95; Перцов Л. А. Природная радиоактивность биосферы. 316 с.; Кузин А. М. Природный радиоактивный фон и его значение для биосферы земли. 117 с.; Моисеев А. А., Иванов В. И. Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене. М. : Энергоатомиздат, 1990. 252 с.; Источники и действие ионизирующей радиации : доклад НКДАР ООН по действию атомной радиации за 1977 г. Генеральной Ассамблее с приложениями. В 3 т. Нью-Йорк, 1978. Т. 1; Дорман Л. И. Современное состояние проблемы вариаций космических лучей // Элементарные частицы и космические лучи: сборник статей / под ред. А. Рамакришнана. М. : Мир, 1965.



тенсивность на уровне моря намного выше той интенсивности, которую имеют нейтроны, возникающие в земной коре. Поэтому на поверхности Земли в нейтронном излучении преобладают вторичные нейтроны космических лучей. Интегральная интенсивность нейтронов космического происхождения на уровне моря соответствует примерно 230 нейтр/(см<sup>2</sup>·сутки), а поток нейтронов земного происхождения составляет от этой величины незначительную долю, которая определяется от 5 до 20 %<sup>1</sup>.

2. Нейтронный фон вблизи поверхности Земли в более чем 99 % случаев достаточно стабилен (и может считаться стационарным эргодическим случайным процессом). Это подтверждают как данные непрерывного мониторинга нейтронного фона Института физики Земли<sup>2</sup>, так и наши многочисленные длительные наблюдения.

Возможны, хотя и чрезвычайно редки, реже чем один раз в 2–4 года, «гигантские», т. е. более чем десятикратные, всплески интенсивности нейтронного фона<sup>3</sup>. Как правило, они сильно коррелируют с магнитными бурями и потому могут прогнозироваться заранее.

3. Случайный поток импульсов на выходе детекторов (обусловленных фоновым как нейтронным, так и гамма-излучением) очень хорошо согласуется с математической моделью случайного пуассоновского потока. Особенно близки к теоретически ожидаемым статистические характеристики нейтронного фона (если не учитывать упомянутые в п. 2 редкие всплески).

---

<sup>1</sup> Дорман Л. И. Современное состояние проблемы вариаций космических лучей.

<sup>2</sup> Сайт станции космического излучения Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова [Электронный ресурс]. URL: <http://helios.izmiran.rssi.ru/cosray/main.htm> (дата обращения 08.10.2009).

<sup>3</sup> Викторов Л. В., Могильникова Ю. А. Вариации нейтронного поля Земли. С. 95; Дорман Л. И. Современное состояние проблемы вариаций космических лучей; Сайт станции космического излучения Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова

4. Несколько иной результат (по сравнению с нейтронным фоном) в исследованиях<sup>1</sup> получен по гамма-фону.

Главные особенности флуктуаций гамма-фона таковы. Даже в течение сравнительно небольших промежутков времени наблюдения (порядка 1–2 часов и менее) СКО значений скорости счета гамма-фона при неподвижном комплексе РК превышает теоретическое значение, как правило, в 1,3–1,6 раза (доходит изредка до 2,0). Условно эти флуктуации гамма-фона назовем коротковременными. Существенны суточные изменения уровня (среднего значения) фона. Однако таковые суточные флуктуации зависят от региона, в котором проводятся измерения, времени года и др. факторов. Чаще всего суточные флуктуации обусловлены резкими изменениями температуры от дня к ночи (что связано, по-видимому, с эманациями радона и аналогичными причинами<sup>2</sup>).

5. Некоторые практические рекомендации при работе в режиме «Обнаружение» при неподвижном комплексе РК.

Обычно при использовании алгоритмов, описанных в пп. 1 и 2, для измерений фона придерживаются следующих правил, выработанных на основе накопленного опыта решения задач обнаружения.

Если нет жестких ограничений во времени, то измерения фона следует проводить *перед каждым сеансом контроля объекта* (или ограниченной группы объектов). При этом интервал времени между окончанием процедуры измерения фона и началом контрольного измерения излучения от объекта должен быть минимальным. Это позволяет существенно снизить вероятности ошибок при решении задачи обнаружения. Если в силу каких-либо ограничений (требование оперативности, особенности условий контроля и т. п.) измерение фона невоз-

---

<sup>1</sup> Викторов Л. В., Андреев В. С., Петров В. Л. Исследования статистических характеристик флуктуаций гамма- и нейтронного фона. С. 10; Статистические характеристики флуктуаций гамма- и нейтронного фона. С. 32.

<sup>2</sup> Перцов Л. А. Природная радиоактивность биосферы. 316 с.

можно провести перед контролем объекта, то можно провести таковой замер в более удобное время, после контроля объекта.

В последнем случае решение задачи обнаружения выполняется путем повторной обработки результата измерения излучения от объекта контроля с новым измеренным значением фона (т.е. повторной обработки результата, извлекаемого из базы данных). В прикладном ПО предусмотрена возможность такой повторной обработки.

Исследования статистических характеристик флуктуаций фона позволили доработать прикладное ПО с целью обеспечения возможности корректировки порогов обнаружения, используемых в алгоритмах. Как показали исследования, наиболее целесообразно и в то же время наиболее просто такую корректировку осуществлять *введением дополнительного коэффициента коррекции параметра флуктуаций фона*  $K_f \geq 1$ ; на указанный коэффициент  $K_f$  в ПО умножается значение теоретически вычисленного порога  $q_0$  (см. п. 1).

Анализ результатов исследований фона показывает, что по умолчанию рекомендуется устанавливать в «ПО обнаружителя» для нейтронного канала значение  $K_f = 1,0-1,3$  (как правило, не более 1,3); для гамма-канала значение  $K_f > 1,5-2,0$  в зависимости от региона, где проводятся измерения. Более точное значение выявляется в результате набора и обработки статистики измерений фона в конкретных условиях. Еще раз следует подчеркнуть, что здесь речь идет о случаях проведения РК средствами неподвижного комплекса.

Исследования<sup>1</sup> показывают, что уровень нейтронного фона практически не испытывает сколько-нибудь существенных дополнительных флуктуаций в случаях проведения РК средствами подвижного комплекса. Поэтому для нейтронного канала

---

<sup>1</sup> Викторов Л. В., Могильникова Ю. А. Вариации нейтронного поля Земли. С. 95; Викторов Л. В., Андреев В. С., Петров В. Л. Исследования статистических характеристик флуктуаций гамма- и нейтронного фона. С. 10; Статистические характеристики флуктуаций гамма- и нейтронного фона. С. 32.

пригодны алгоритмы обнаружения, описанные в п. 2; как показывает практика использования подвижных комплексов РК, таковые алгоритмы для нейтронного канала работают почти строго в соответствии с теорией.

Совершенно иная картина наблюдается для гамма-фона в случаях подвижного автомобильного комплекса РК. И литературные данные, и многочисленные исследования свидетельствуют о весьма сильной зависимости уровня гамма-фона от конкретной координаты точки, в которой выполняется измерение. Указанный фактор, как правило, весьма значим в регионах, в которых имеются выходы скальных пород на поверхность. Весьма значительные и резкие изменения уровня гамма-фона наблюдаются также при перемещении по дорогам, для строительства которых используют строительные материалы, сильно различающиеся по уровню радиационной загрязненности. По нашим данным, зачастую в «подушке» дорог используется щебенка, дающая 2–4-кратное превышение уровня фонового излучения по отношению к среднему фону «вне дороги». (Такой повышенный уровень излучения стройматериалов для строительства дорог допускается существующими стандартами, в частности ОСПОРБ-99.) Аналогично может регистрироваться повышенное излучение от различных дорожных сооружений (мостов, дорожных развязок, эстакад, столбов и т. п.).

Один из наиболее ярких примеров сильных флуктуаций гамма-фона, обусловленных придорожными сооружениями и эстакадами, приводится на рис. 1.5.

Однако накопленный практический опыт проведения радиационного контроля показывает, что весьма нередки случаи, когда при движении комплекса РК по дороге гамма-фон не претерпевает резких скачков, а меняется достаточно плавно, примерно так, как изображено на рис. 1.6. При использовании вертолетного комплекса РК также, как правило, наблюдаются аналогичные плавные изменения гамма-фона (рис. 1.7).

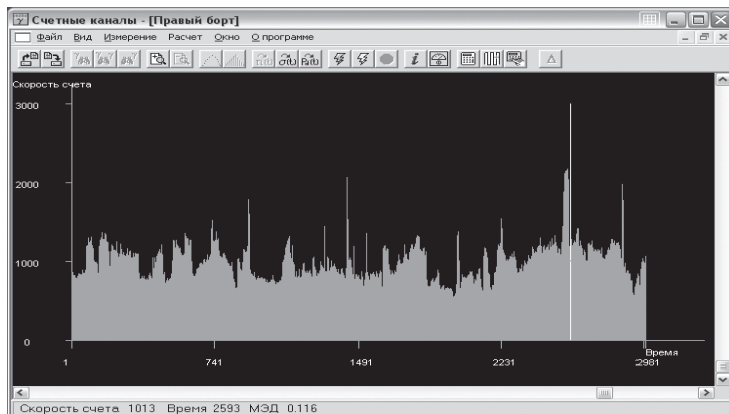


Рис. 1.5. Результат измерения, выполненного счетным гамма-каналом комплекса РКГ при перемещении по московской кольцевой автомобильной дороге

Стрелками показаны сигналы, обнаруженные средствами ПО в режиме «Поиск» (алгоритмом «Поиск», описанным в п. 4); длительность обнаруженных сигналов составляет соответственно 50; 60; 15; 45 с.

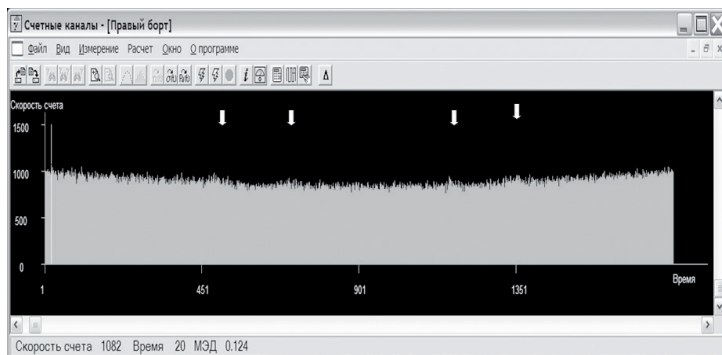


Рис. 1.6. Результат измерения, выполненного счетным гамма-каналом комплекса РКГ в условиях медленно меняющегося уровня фона (участок вдоль лесной дороги)

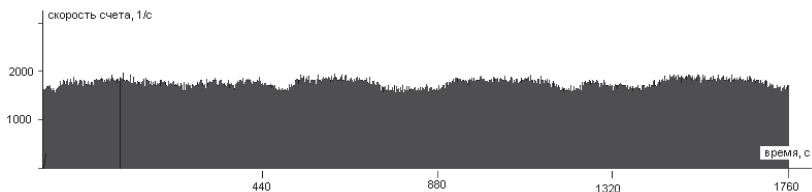


Рис. 1.7. Результат измерения, выполненного счетным гамма-каналом вертолетного комплекса «Соратник-03» над гладкой безлесной площадью размерами  $1 \times 1,5 \text{ км}^2$  (сеанс измерения № 552 от 15.12.2005)

Из описанных характерных особенностей гамма-фона следует, что алгоритмы обнаружения<sup>1</sup>, в основу которых положен метод предварительного измерения среднего уровня фона (алгоритмы, описанные в п. 4), для гамма-каналов и в случае подвижного комплекса РК (неважно, автомобильного или вертолетного), как правило, оказываются *совершенно непригодными*. Сказанное относится и к случаям плавного изменения гамма-фона, показанным в качестве примера на рис. 1.6 и 1.7. Аналогичные ситуации «плавного изменения гамма-фона» выявились при испытаниях комплекса «Соратник-01», когда алгоритм обнаружения, описанный в п. 4, не сработал.

Таким образом, выявилась актуальная необходимость разработки принципиально новых алгоритмов обнаружения.

В п. 6 ниже описан алгоритм поиска и обнаружения слабых источников ИИ, запатентованный сотрудниками КЭФ<sup>2</sup>, в котором предусмотрена «адаптация» обнаружителя к описанным условиям больших флуктуаций гамма-фона при движении комплекса РК. Подчеркнем, что новый алгоритм, названный для краткости в тексте ниже «Поиск», специально разрабатывался так, чтобы не требовалось предварительного (до начала процедуры поиска) измерения фона.

<sup>1</sup> Пат. 2140660 Рос. Федерация.

<sup>2</sup> Пат. 2242024 Рос. Федерация

## 6. Алгоритм «Поиск»

В отличие от задач, описанных в пп. 1 и 2, в задаче «Поиск» фон не измеряется заранее, до начала контроля объекта (территории), и потому уровень фона заранее не известен. Поскольку априори считаем процедуру поиска довольно длительной и заранее известно, что имеет место значительное изменение («уплывание») среднего уровня фона (п. 3), то конкретные значения среднего уровня фона должны определяться оперативно, в процессе непрерывной обработки результатов измерений при движении комплекса РК по маршруту поиска в режиме online.

Операции, выполняемые перед выездом на маршрут поиска:

- подготовка карт территории поиска;
- разработка маршрута поиска (начальная и конечная точки маршрута, проработка тактики поиска (серпантином или иначе));
- составление плана-задания на выполнение работ по поиску источников ИИ.

Разработанный авторами описываемой разработки алгоритм «Поиск» [2] сводится к выполнению следующей последовательности операций.

Сразу после выезда на маршрут поиска:

- Нажимается кнопка «Старт».
- По сигналу «Старт» начинается измерение непрерывной аддитивной смеси «сигнал плюс фон»  $n(t)$  (ниже используем термин «реализация  $n(t)$ »).
- Синхронно с измерениями начинается обработка реализации  $n(t)$ .

### 6.1. Общая обработка реализации $n(t)$ средствами ПО

Средствами ПО сначала из реализации  $n(t)$  выделяется подинтервал № 1. Длительность подинтервала № 1 (времени экспозиции), как показывает анализ, должна быть  $t_{\text{эсп}} \geq 4t_{\text{е}}$ .

Обычно значение  $t_{\text{эксп}}$  назначают не более  $10t_e$ . Опыт работы показывает, что оптимальным для автомобильного комплекса является соотношение  $t_{\text{эксп}} = (5-6) \cdot t_e$ , где  $t_e = 2r_o/v_o$ . При  $t_e < 8$  с используется ограничение  $t_{\text{эксп}} = 50$  с; при  $t_e > 200$  с используется ограничение  $t_{\text{эксп}} = 1000$  с.

### Первый этап обработки реализации $n_1(t)$

Результат измерений, полученных на первом подинтервале  $n_1(t)$ , пропускается через фильтр-сглаживатель типа «скользящее временное окно» с временем усреднения  $t_e$  (точно такая же обработка, как и в п. 2). Эта операция необходима для введения в блок «Аппроксимация» первичных значений параметров обрабатываемой реализации (1.12).

Алгоритм определения этих первичных значений таков: после фильтрации «скользящим средним» выявятся участки с максимумами («всплесками вверх»). Из них берется максимальный по абсолютной величине всплеск, ему и присваивается значение  $t_{m1}$  для первой итерации. Средний уровень фона для первой итерации  $b^*_{\cdot 1}$  берется равным средней скорости счета по всей реализации  $n_1(t)$ . А амплитуда сигнала для первой итерации берется равной (или близкой) к порогу обнаружения с вероятностью 50 % ( $a^*_{o1} = a_{\min}$ ). В свою очередь, пороговое  $a_{\min}$  может быть вычислено по формуле (1.5), куда подставляется  $q_p = 3,2$ .

### Второй этап обработки реализации $n_1(t)$

Результат измерений  $n_1(t)$  пропускается через блок «Аппроксимация» (аппроксимировать заданным выражением):

$$n_1(t) = \bar{b}_1 + k_{b1}t + a_1(t), \quad (1.12)$$

где  $a_1(t)$  описывается формулой (1.9).

Предварительно в блок «Аппроксимация» вводятся первичные значения  $\bar{b}^*_{\cdot 1}$ ,  $a^*_{o1}$ ,  $t_{m1}$ , полученные на первом этапе обработки (при этом  $k_{b1} = 0$ ).



После решения задачи «Аппроксимация» получаем: фактический (по результатам измерений и обработки) уровень фона  $\bar{b}_1$  для первого подинтервала, амплитуду  $a_{o1}$  и уточненное временное положение  $t_{m1}$  сигнала.

### Третий этап обработки реализации $n_1(t)$

Решается задача обнаружения квазиподвижного источника описанным в п. 1 методом. Полученная достаточная статистика  $\eta$  сравнивается с порогом  $q_o$ . Очевидно, что в большинстве случаев  $\eta < q_o$ , т. е.  $\eta$  ниже порога — выполняется переход к следующим процедурам обработки.

Если  $\eta > q_o$ , то формируется информация «Есть», т. е. «Источник обнаружен». Дальнейшие действия должны регламентироваться планом-заданием. На третьем этапе важно правильно установить порог обнаружения  $q_o$ .

## 6.2. Дальнейшие измерения и обработка

Параллельно с процедурой обработки реализации  $n_1(t)$  для подинтервала № 1 продолжается измерение (накопление) аналогичной реализации  $n_2(t)$  для подинтервала № 2, длительность которого, так же как и первого, равна  $t_{\text{экс}}$ .

По окончании подинтервала № 2 реализация  $n_2(t)$  подвергается обработке, точно такой же, как описано в пп. 3.3–3.5.

Уместно сделать важное замечание о перекрытии соседних подинтервалов. Каждый последующий  $(i + 1)$ -й подинтервал накладывается на предыдущий  $i$ -й подинтервал на величину  $2t_e$ . Таковое перекрытие необходимо для обработки в случаях, когда сигнал попадает на край подинтервала.

Далее циклически повторяются действия по пп. 3.3–3.5 для подинтервалов №№ 3, 4, 5 и т. д., вплоть до завершения маршрута, указанного в плане-задании, если иного алгоритма не предписано.

### 6.3. Завершающие операции алгоритма «Поиск»

После нажатия кнопки «Стоп» в конечной точке маршрута программа фиксирует конкретное фактическое полное время поиска (серии измерений)  $t_{\text{сер.}}$ .

Очевидно, что программа должна выполнить полный перерасчет всей зарегистрированной реализации  $n_1(t)$  с новым значением  $t_{\text{сер.}}$ .

По поводу устойчивости алгоритма «Поиск» к ложным тревогам необходимо добавить следующее.

По соотношению амплитуд сигналов, обнаруженных в процессе контрольного объезда по маршруту, оператор может судить о том, насколько вероятна ошибка обнаружения, и принимать оправданное решение по вопросу повторных проездов возле точек с предполагаемым источником. Если факт обнаружения в упомянутых точках при повторном проезде подтверждается, то считается, что вероятность обнаружения составляет не менее 99 %. Далее предпринимаются соответствующие действия в соответствии с общей тактикой поиска — обезвреживание источников, измерение с целью идентификации радионуклидного состава, изучение предыстории точки загрязнения (или происхождение найденного источника) и т. п.


## 7. Практическая часть лабораторной работы

### 7.1. Вводные замечания


Ниже описывается порядок выполнения практической части лабораторной работы № 1 — решение задачи обнаружения ИИИ средствами прикладного ПО комплекса «Соратник-01».

Для выполнения п. 7 лабораторной работы № 1 используется учебное программное обеспечение комплекса «Соратник-01» (УПО-01), созданное для офицеров, подготавливае-

мых к обслуживанию комплекса СРК, и для курсантов военных училищ<sup>1</sup>.

УПО-01 состоит из трех независимых фрагментов, запускаемых после открытия общего диалогового окна при помощи иконки  — Soratnik:

- интерактивное учебное пособие (ИУП);
- тренажер-имитатор;
- видеофильм.

ИУП может запускаться либо из диалогового окна УПО-01, либо непосредственно при помощи иконки  (Help), выведенной на рабочий стол учебного компьютера. ИУП представляет собой специальную электронную книгу, предназначенную для изучения комплекса, которая содержит подробные сведения о комплексе СРК и способах решения основных задач, выполняемых его аппаратными и программными средствами. ИУП выполнен в форме текстов в формате \*.html и поясняющих рисунков, имеет внутренние интерактивные связи. В ИУП размещен документ «Прикладное программное обеспечение “Соратник-01”. Руководство оператора», в котором подробно описаны вопросы работы с прикладным ПО комплекса «Соратник-01».

## 7.2. Порядок выполнения практической части

Выполняются учебно-тренировочные работы из ИУП, №№ 4 и 5, из раздела «Работа с центральной ЭВМ (ЦЭВМ) комплекса СРК «Соратник-01»: тренировочные работы «Имитация процедуры обнаружения источника излучения в режимах «Неподвижный» и «Подвижный»».

Последовательность выполнения указанных работ №№ 4 и 5 и все подробности изложены в тексте ИУП в соответствующих вкладках. При выполнении работ соблюдать следующие рекомендации:

<sup>1</sup> Часто встречающееся в текстах УПО-01 слово «курсант» авторы настоящего методического пособия (подготовленного для студентов) просят читать как «студент».

- Рекомендуемое время измерения фона 200 с; измерения сигнала в режиме «Неподвижный» 100 с.
- Рекомендуемые параметры контроля в режиме «Подвижный»: расстояние до объекта 50 м; скорость 5 м/с.
- Уровни имитируемых сигналов задает преподаватель путем редактирования файлов инициализации.

**Внимание!** Редактирование файлов инициализации студентам не разрешается! (Поскольку некорректное редактирование может привести к отказу или сбою в работе ПО «Соратник-01».)

Результаты выполненной работы сохранить в рабочем протоколе для оформления отчета.

## Коллоквиум по лабораторной работе № 1

1. На каких разделах математики основаны алгоритмы обнаружения?

2. Вопросы из основных разделов теории вероятностей в части, связанной с регистрацией сигналов на выходе счетных детекторов ионизирующих излучений (ИИ):

- распределение (закон) Пуассона;
- параметры распределения Пуассона и их связь с измеренными на выходе счетного детектора ИИ величинами;
- вычисление моментов 1-го и 2-го порядка закона Пуассона (математическое ожидание, дисперсия);
- условия, при которых можно принимать приближение нормального закона распределения вместо пуассоновского;
- связь параметров нормального закона распределения с параметрами пуассоновского закона.

3. В чем суть решения задачи обнаружения? (Основные положения из теории статистических гипотез.)

4. Почему в прикладном ПО комплекса «Соратник» необходимо использовать оптимальные алгоритмы обнаружения?

В чем заключается их оптимальность? (Критерии обнаружения.)  
В каких случаях используют критерий обнаружения Байеса?  
В чем его главные отличия от критерия Неймана — Пирсона?

5. В чем заключается физический смысл параметра «достаточная статистика»  $\eta$ ? Каковы параметры плотности распределения величины  $\eta$  в зависимости от уровня сигнала?

6. Каков алгоритм обнаружения неподвижного источника? В чем суть алгоритма, что такое «решающее правило»? Как его используют?

7. Каков алгоритм обнаружения ИИ в режиме «Подвижный»? В чем суть алгоритма, особенности вычисления  $\eta$  и порогов обнаружения?

8. Что такое флуктуации фона и каковы особенности учета этих флуктуаций в алгоритмах обнаружения?

9. В чем суть алгоритма «Поиск», его сходство с алгоритмом обнаружения подвижного источника и отличия от него?

## Содержание отчета

Студенты представляют по проделанной лабораторной работе краткий аннотированный отчет (один на бригаду), который должен в сжатой форме содержать:

- название и цель работы;
- основные положения из теоретической части работы;
- таблицы с результатами решения задач обнаружения при выполнении учебно-тренировочных задач из ИУП, №№ 4 и 5 из раздела «Работа с центральной ЭВМ (ЦЭВМ) комплекса СРК «Соратник-01»» (по каждому случаю представить краткий комментарий; по наиболее отличительным случаям представить объяснения и выводы).

---

# Лабораторная работа № 2

## Измерения основных характеристик счетчиков нейтронов ПД-631М

---

### Введение

Цели работы:

- Изучение физических принципов работы счетчика нейтронов ПД-631М.
- Ознакомление с установкой для измерения основных параметров счетчика нейтронов ПД-631М.
- Выполнение измерений основных параметров счетчика нейтронов ПД-631М.

Нейтронные каналы комплексов «Советник» и «Соратник» построены на нейтронных детекторах серии «ДИН». Эти детекторы имеют активную поверхность  $0,7 \text{ м}^2$  и предназначены для измерения потока нейтронов на уровне фона ( $10\text{--}30 \text{ н/м}^2$ ). Для получения высокой эффективности регистрации нейтронов каждый детектор состоит из 23 счетчиков нейтронов ПД-631М, которые являются газовыми пропорциональными детекторами на  $^3\text{He}$ .

## 1. Основные положения

Газонаполненный пропорциональный детектор относится к ионизационным детекторам, работающим в режиме газового усиления. При прохождении через газ заряженная частица, теряя энергию  $E$ , образует в треке в среднем  $N_0$  электронных пар (первичная ионизация). Величина  $N_0 = E/\omega$ , где  $\omega$  — средняя энергия, затрачиваемая на образование одной пары. Электроны и ионы под действием внешнего электрического поля дрейфуют через газ. Если напряженность электрического поля в детекторе достаточно велика, то электроны набирают на длине свободного пробега энергию, достаточную для ионизации молекул или атомов газа (вторичная ионизация).

Если на пути в 1 см по направлению электрического поля электроны испытают  $\alpha$  соударений, приводящих к ионизации, то количество пар ионов, образованных  $N$ -электронами в слое  $dx$ :

$$dN = N a(x)dx,$$

где  $a$  — коэффициент ударной ионизации. Тогда количество пар ионов во всей лавине

$$N = N_0 \left( \int_{x_1}^{x_2} a(x') dx' \right), \quad (2.1)$$

где  $x_1$  — координата места первичной ионизации;  $x_2$  — координата конца лавины. Увеличение числа пар ионов в результате ударной ионизации характеризуется коэффициентом газового усиления  $m$ , равным отношению полного числа пар ионов  $N$  в лавине к числу пар ионов  $N_0$ :  $m = N/N_0$ .

Из формулы (2.1) видно, что количество образованных в лавине пар ионов определяется не только значениями  $N_0$  и  $a$ , но и местом первичной ионизации. Следовательно, заряд  $Q$ , индуцированный во внешнюю цепь ионизационного детектора с газовым усилением и пропорциональный числу дрейфую-

ших зарядов  $Q \sim N$ , также зависит от координаты трека частицы. Очевидно, что заряд  $Q$ , индуцированный во внешнюю цепь, будет пропорционален потерянной частицей энергии  $E$  только в том случае, если каждый первичный электрон независимо от места его образования создаст в процессе усиления в среднем одно и то же количество пар ионов. Такое условие выполняется в детекторах цилиндрической формы, в которых диаметр цилиндра (катода) много больше диаметра анода — металлической нити, натянутой по оси цилиндра (рис. 2.1). Действительно, из-за резкой неоднородности электрического поля  $\epsilon$  вдоль направления  $r$  ( $\epsilon = U_0/(r \ln(r_k/r_a))$ ), где  $U_0$  — разность потенциалов на электродах,  $r_k$  и  $r_a$  — радиусы катода и анода соответственно, коэффициент ударной ионизации  $a$  отличается от нуля лишь в очень малом объеме, прилегающем к нити. Иначе говоря, в цилиндрических детекторах для всех первичных электронов условия образования лавин одинаковы и не зависят от места прохождения частицы. Для достаточно больших значений коэффициента газового усиления  $m$  индуцированным зарядом от движения электронов и ионов до области ударной ионизации можно пренебречь и считать, что заряд  $Q$  во внешней цепи определяется только числом электронов и ионов, дрейфующих из области ударной ионизации, и пропорционален энергии частиц:  $Q \sim mN_0 = mE/\omega$ . Именно поэтому детекторы с газовым усилением, имеющие цилиндрическую форму, называют пропорциональными счетчиками. Так как развитие электронно-ионных лавин идет у анода на расстояниях, равных нескольким диаметрам нити, путь дрейфа электронов до анода невелик, поэтому основной вклад в заряд дает ток, возникающий во внешней цепи от дрейфа положительных ионов к катоду.

Заряд  $Q$  во внешней цепи пропорционального счетчика, а также его временные характеристики зависят от сопротивления нагрузки  $R$  и эквивалентной емкости  $C$  (суммарная емкость счетчика и подключенных к нему цепей).



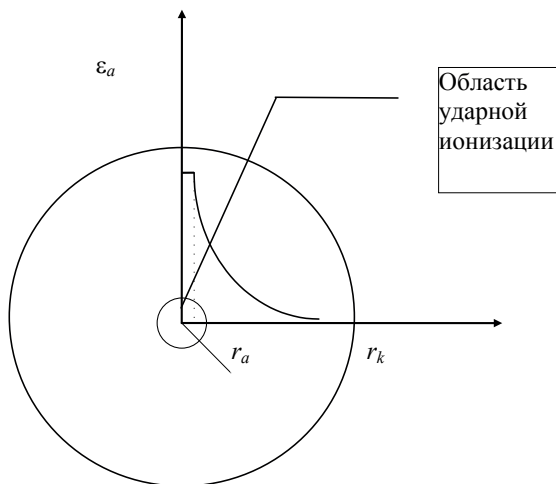


Рис. 2.1. Зависимость напряженности электрического поля от расстояния до центральной оси в детекторе цилиндрической формы

При выборе  $RC \gg T^+$  — времени дрейфа ионов из области ударной ионизации максимальный заряд во внешней цепи равен  $Q_{\text{макс}} = mN_0$ . Однако необходимости выбирать  $RC \gg T^+$  нет, так как основной вклад в индуцированный заряд  $Q$  дает движение ионов в сильном поле вблизи анода. Оказывается, что при значениях  $RC$  порядка нескольких микросекунд во внешнюю цепь индуцируется около 50 % максимального значения заряда. При этом пропорциональные свойства счетчика сохраняются, а его временное разрешение существенно улучшается. С другой стороны,  $RC$  должно быть по крайней мере на порядок больше  $T^+$  — времени дрейфа электронов первичной ионизации от катода к аноду, чтобы не нарушались пропорциональные свойства счетчика. Следует отметить, что на практике формирование импульсов с детектора достигается не путем изменения  $R$ , а подбором полосы пропускания усилителя.

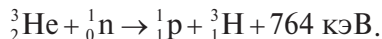
Ударная ионизация является основным, но не единственным фактором, определяющим развитие лавин в детекторе. При дрейфе электронов в сильных электрических полях наряду с процессом ударной ионизации имеет место возбуждение молекул или атомов газа. Возвращаясь в основное состояние, молекулы испускают фотоны, которые могут вызвать фотоэффект на катоде счетчика. Фотоэлектрон, вышедший с поверхности катода, создает в области анода дополнительную ионизацию. Кроме того, если потенциальная энергия положительного иона при подходе к катоду из области ударной ионизации превышает удвоенную работу выхода электрона с поверхности катода, то может появиться еще один свободный электрон. Этот электрон на пути к аноду, в свою очередь, образует электронно-ионную лавину. Вероятность подобных процессов в пропорциональных детекторах невелика.

Коэффициент газового усиления  $m$  зависит от напряжения  $U_0$ , приложенного к электродам пропорционального детектора, причем так, что незначительная нестабильность (дрейф) источника питания может привести к существенным изменениям коэффициента  $m$ . Обычно  $m$  определяют экспериментально, методом сравнения заряда газонаполненного пропорционального детектора  $Q_{\text{пл}}$  и того же детектора при работе в режиме ионизационной камеры  $Q_{\text{ик}}$  в отсутствие газового усиления. В этом случае  $m = Q_{\text{пл}}/Q_{\text{ик}}$ .

Газоразрядные пропорциональные детекторы нашли широкое применение при регистрации различных видов излучений, в частности нейтронов. В связи с тем, что нейтроны не могут производить непосредственную ионизацию атомов, их детектирование осуществляется либо путем образования ядер отдачи в процессе упругого рассеяния (для быстрых нейтронов), либо по ядерным реакциям, продуктами которых являются заряженные частицы (для медленных и тепловых нейтронов). Ниже рассматривается второй метод.

В экспериментах по регистрации нейтронов часто используется счетчик, наполненный газом  $^3\text{He}$  (гелиевый счетчик),

в котором под действием нейтронов идет экзоэнергетическая реакция



Энергия 764 кэВ, выделяемая в этой реакции вместе с энергией нейтрона, передается протону и тритию и распределяется между ними обратно пропорционально их массам. Продукты реакции разлетаются в противоположные стороны и ионизируют газ в рабочем объеме детектора, вследствие чего на его выходе индуцируется электрический сигнал.

Принципиально гелиевые счетчики могут использоваться для регистрации нейтронов любых энергий, однако из-за больших сечений реакции  ${}^3\text{He} (\text{n}, \text{p}) {}^3\text{H}$  для тепловых и медленных нейтронов (5330 барн) максимальная эффективность регистрации достигается именно в этой области энергий, что и определяет основное применение таких детекторов.

В зависимости от типа гелиевого счетчика они заполняются газовой смесью из  ${}^3\text{He}$ , Ar и ряда других компонентов, при этом содержание  ${}^3\text{He}$  может колебаться в достаточно широких пределах, вплоть до 96 %. Добавки инертных газов служат для улучшения выходных параметров счетчика.

В том случае, когда оба продукта реакции полностью теряют свою энергию на ионизацию в рабочем объеме детектора, амплитудное распределение импульсов на выходе гелиевого счетчика для моноэнергетических нейтронов (функция отклика) имеет вид изолированного пика (пик полного поглощения). Если пробеги продуктов реакции не укладываются внутри рабочего объема и попадают в катод (стеночный эффект), то в амплитудном распределении появляется низкоэнергетический «хвост», соответствующий частицам, потерявшим в счетчике только часть своей энергии. Типичный спектр продуктов реакции для тепловых нейтронов представлен на рис. 2.2.

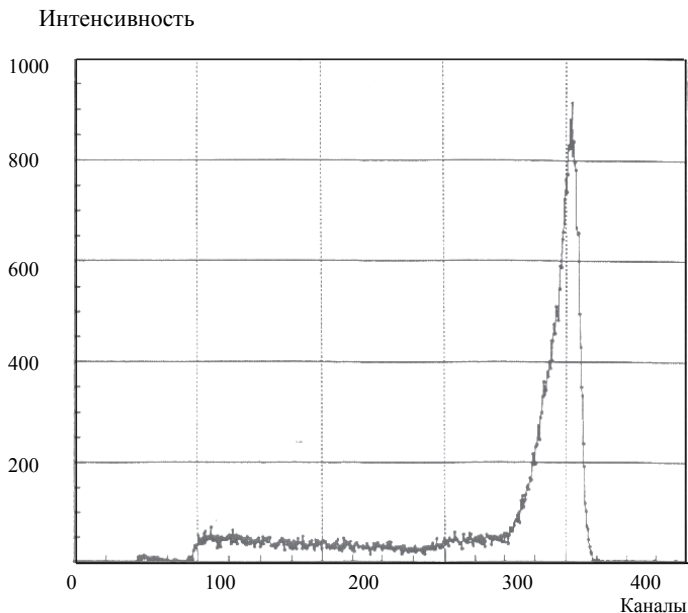


Рис. 2.2. Типичный спектр продуктов реакции, зарегистрированных пропорциональным гелиевым счетчиком

## 2. Лабораторная установка

Установка для измерения характеристик детекторов (рис. 2.3) состоит из источника быстрых нейтронов (1), замедлителя (2), детектора (3), предусилителя (4), спектрометрического усилителя (5), платы АЦП, встроенной в компьютер (6), высоковольтного источника питания (7) и осциллографа (8) для наблюдения и измерения сигналов.

В работе используется закрытый плутоний — бериллиевый источник быстрых нейтронов типа ИБН-28 с потоком быстрых нейтронов в телесный угол  $4\pi$  —  $10^4 \text{ с}^{-1}$ . Герметическая капсула источника выполнена из коррозионно-стойкой нержавеющей

стали. Типовой энергетический спектр нейтронов таких источников с максимальной энергией 12 МэВ представлен на рис. 2.4. В качестве замедлителя быстрых нейтронов используются стандартные водородосодержащие блоки из полиэтилена.

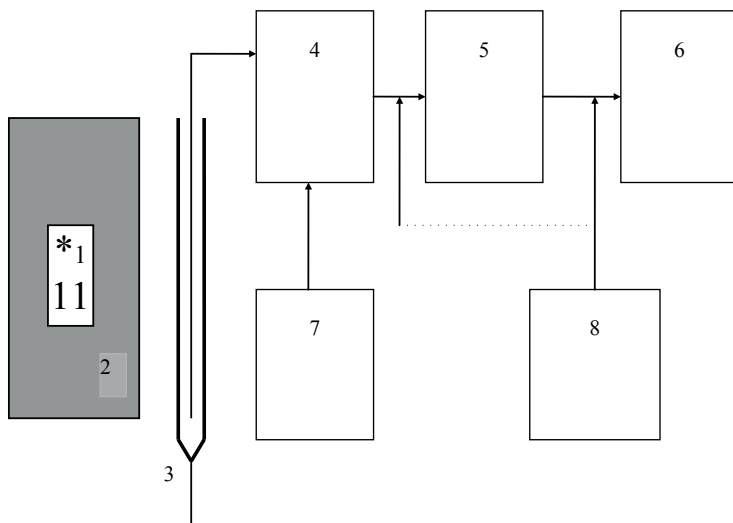


Рис. 2.3. Функциональная схема установки для регистрации медленных нейтронов:

1 — источник быстрых нейтронов, 2 — замедлитель, 3 — счетчик, 4 — предусилитель, 5 — усилитель, 6 — компьютер со встроенной платой АЦП, 7 — источник питания счетчика, 8 — осциллограф

Для регистрации тепловых нейтронов в работе используются два газонаполненных пропорциональных детектора: гелиевый счетчик ПД631М. Он представляет собой цилиндрическую трубку из нержавеющей стали диаметром 31 мм и длиной 103 см, внутри которой на стеклянных изоляторах натянута вольфрамовая нить диаметром 0,05 мм. Детектор ПД631М заполнен газовой смесью из  $^3\text{He}$  высокой степени очистки (99,99 %) с незначительными добавками Ar и Ne под давлением 4 атм. Рабочее

напряжение питания 1750 В. Схема включения детекторов позволяет сформировать на нагрузке отрицательный электрический сигнал с максимальной амплитудой 100 мВ и временем нарастания порядка 5 мкс, который после усиления и формирования ( $T_{\phi} = 10$  мкс) подается на плату спектрометрического АЦП, встроенную в компьютер. Программное обеспечение работы АЦП и обработки накопленных данных осуществляется с помощью пакета ATSpec2.702.

Выход  
нейтронов,  
отн. ед.

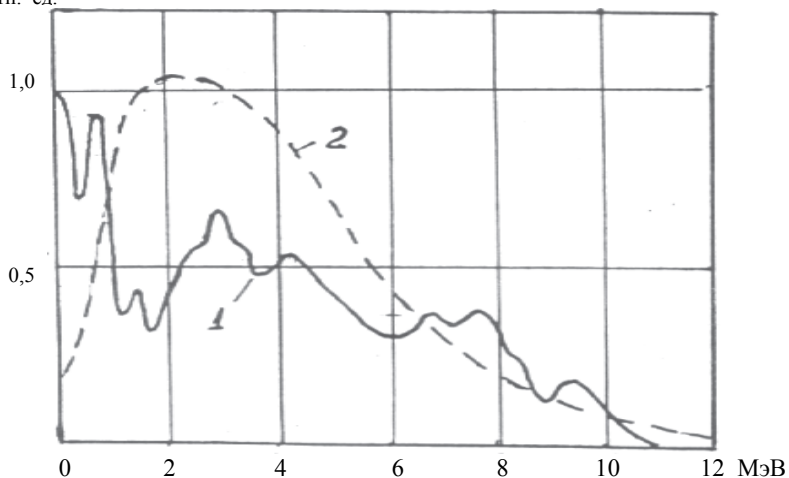


Рис. 2.4. Спектры нейтронных источников:

1 — Pu- $\alpha$ -Be, 2 — Cf-252

**Внимание!** При работе с источником необходимо соблюдать требования радиационной безопасности. Источник нейтронов должен постоянно храниться в защитном контейнере и выниматься из него и устанавливаться около детектора только на период измерений. При измерениях соблюдать защиту расстоянием и временем!

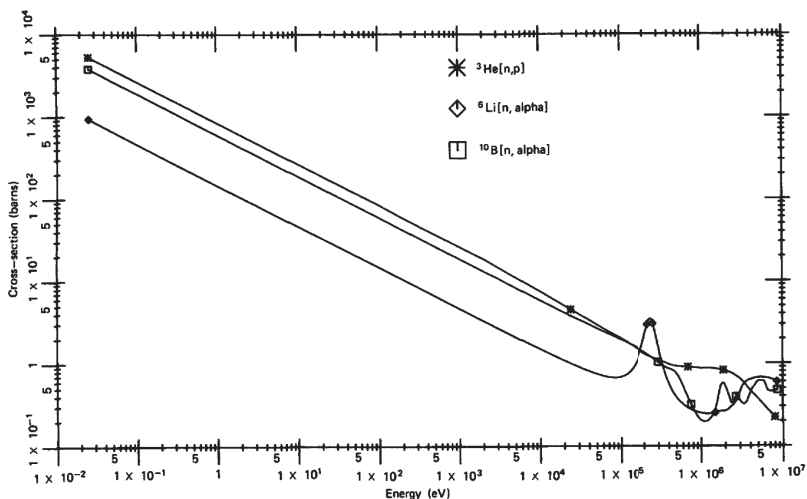


Рис. 2.5. Сечения ядерных реакций

### 3. Порядок выполнения работы

Перед началом работы проверить подключение блоков электронной аппаратуры в соответствии с функциональной схемой установки. Подключить гелиевый счетчик. Включить питание всех приборов и компьютера и дать им прогреться в течение 10 мин. Вынуть источник нейтронов из контейнера и установить его в полиэтиленовый замедлитель возле детектора. При указанном преподавателем напряжении питания на счетчике подобрать усиление тракта таким образом, чтобы на экране осциллографа наблюдались импульсы от счетчика.

1. Измерение параметров сигнала гелиевого счетчика, работающего в режиме газового усиления при паспортном напряжении питания 1750 В. По осциллографу измерить амплитуду и длительность фронта импульса напряжения после спектрометри-

ческого усилителя. Оценить время сбора ионного компонента заряда, сравнить его с длительностью фронта импульса.

2. *Измерение амплитудного спектра продуктов реакции и его анализ.* Запустить программу *ATSpec 2/702*. Набрать спектр продуктов реакции, задав время измерения из условия получения в максимуме пика порядка 2000 импульсов. Идентифицировать все участки спектра с точки зрения протекающих в детекторе процессов. Провести калибровку энергетической шкалы спектрометрического тракта по значениям энергий в пике полного поглощения и по левому краю одной из ступенек от стеночного эффекта. По результатам калибровки определить значение энергии, соответствующее левому краю второй ступеньки. Определить относительное и абсолютное энергетическое разрешение измерительного тракта. Вычислить вклад стеночного эффекта как отношение площади ступенек  $S_{\text{ст}}$  к общей площади спектра  $S_0$ , выраженное в процентах. По значению коэффициента усиления спектрометрического усилителя и зарядочувствительности предусилителя вычислить заряд на выходе счетчика, соответствующий поглощенной энергии 764 кэВ.

3. *Измерение коэффициента газового усиления пропорционального счетчика.* По осциллографу снять зависимость максимальной амплитуды импульсов после усилителя от напряжения питания в диапазоне напряжений от 1000 до 1800 вольт. Выделить пропорциональный режим работы счетчика и режим работы ионизационной камеры. По отношению амплитуд при различных режимах работы счетчика определить коэффициент газового усиления и его зависимость от напряжения питания.

4. *Проведение измерений положения пика полного поглощения для пяти счетчиков.* Повторить для пяти счетчиков все измерения, указанные в пп. 3.2. Определить по спектрам положение пика полного поглощения ( $P_i$ ) для каждого счетчика и занести эти значения в таблицу. Вычислить среднее значение  $P_i$  и най-



ти относительный разброс  $P_i$  для каждого счетчика. Определить максимальное значение относительного разброса  $P_i$ .

## Содержание отчета

Студенты, проходящие лабораторный практикум по курсу «Системы и методы радиационного контроля», представляют по лабораторной работе краткий аннотированный отчет (один на бригаду), который должен в сжатой форме содержать:

- название и цель работы;
- устройство и физические принципы работы счетчиков нейтронов ПД-631М;
- схему и основные особенности работы установки для измерения параметров ПД-631М;
- результаты измерений и обработки основных параметров ПД-631М, полученных при выполнении лабораторной работы.

---

# Лабораторная работа № 3

## Измерения основных технических характеристик блоков детектирования гамма-излучения сцинтилляционных спектрометрических на установке «Спектр-1»

---

### Введение

Цели работы:

- Изучение физических принципов работы блоков детектирования гамма-излучения сцинтилляционных спектрометрических.
- Изучение прикладных вопросов выполнения гамма-спектрометрических измерений с использованием упомянутых блоков детектирования и спектрометрической аппаратуры.
- Ознакомление с метрологическими аспектами проведения измерений основных технических характеристик (ОТХ) блоков детектирования сцинтилляционных спектрометрических.
- Выполнение измерений ОТХ блоков детектирования сцинтилляционных спектрометрических с оценкой погрешности результатов измерений.

Настоящая лабораторная работа основана на использовании документа «Методика измерений основных технических характеристик блоков детектирования гамма-излучения сцинтилляционных спектрометрических на установке Спектр-1» (МВИ 21-223-15), разработанного на кафедре экспериментальной физики УрФУ и аттестованного Федеральным государственным унитарным предприятием «Уральский научно-исследовательский институт метрологии» (ФГУП «УНИИМ») (Свидетельство об аттестации методики измерений № 223.0138/01.00258/2015 от 26.06.2015).

Важно особо подчеркнуть, что разработка и аттестация методики выполнения измерений являлись важнейшими этапами создания *метрологического обеспечения производства детекторов гамма-излучения*. Безусловно, не менее важным являлись разработка и создание образцовой установки «Спектр-1», ее метрологическая аттестация и периодическая поверка органами «Росстандарта».

Перед началом выполнения лабораторной работы студенты должны ознакомиться с «Руководством по эксплуатации установки для измерений основных технических характеристик блоков детектирования гамма-излучения сцинтилляционных «Спектр-1» (РЭ), в котором изложены технические характеристики, устройство и принцип действия, а также правила эксплуатации установки (файл «РЭ\_СПЕКТР1» прилагается).

Кроме того, студенты должны вспомнить:

- основные термины по сцинтилляционной технике и их физический смысл: для этого можно воспользоваться словарем терминов «Сцинтилляционные детекторы»<sup>1</sup> (файл «Сцинтил\_Детекторы\_Термины2003В» прилагается);
- основные термины и понятия из метрологии, а также теории вероятностей (в частности, что такое среднее арифметическое значение, медиана, СКО).

---

<sup>1</sup> Сцинтилляционные детекторы: словарь терминов / сост. Л. В. Викторов, К. В. Ивановских, В. Л. Петров. 2-е изд., испр. и доп. Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2003. 18 с.

Обязательным является также предварительное изучение и соблюдение правил радиационной безопасности при работе с источниками ионизирующих излучений в соответствии с источниками<sup>1</sup>.

Порядок действий для выполнения лабораторной работы № 3 приводится согласно документу МВИ 21–223–15 «Блоки детектирования гамма-излучения сцинтилляционные спектрометрические. Методика измерений основных технических характеристик на установке «Спектр-1», введенному в 2015 г. и предназначенному для применения в специализированной лаборатории ФГАОУ ВПО «УрФУ». Данный документ, в свою очередь, опирается на ГОСТ 26652–85 «Блоки детектирования сцинтилляционные. Общие технические требования и методы испытаний» и ГОСТ 26874–86 «Спектрометры энергий ионизирующих излучений. Методы измерения основных параметров». Измерения проводятся на установке «Спектр-1» с использованием прикладной программы LSRM-32, разработанной ГП «ВНИИФТРИ». К числу измеряемых ОТХ относят эффективность регистрации гамма-излучения и относительное амплитудное разрешение.

## 1. Требования к показателям точности измерений

Значения относительного среднего квадратического отклонения (СКО) повторяемости, относительного СКО внутрилабораторной прецизионности, границ относительной систематической погрешности и границ относительной погрешности измерений при доверительной вероятности  $P = 0,95$  приведены в табл. 3.1.

---

<sup>1</sup> Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности. СП 2.6.1.2612–10. Минздрав России, 2010. 78 с.; Нормы радиационной безопасности. Минздрав России, 2009. 116 с.

Таблица 3.1

| Определяемая ОТХ, единицы измерений                        | Диапазон измерений | Относительное СКО повторяемости, $\sigma_r$ , % | Относительное СКО внутрилабораторной прецизионности, $\sigma_{R_L}$ , % | Границы относительной систематической погрешности при $P = 0,95$ , $\pm \delta_{cL}$ , % | Границы относительной погрешности при $P = 0,95$ , $\pm \delta_L$ , % |
|--|--------------------|---|---|--|---|
| Эффективность регистрации гамма-излучения, см <sup>2</sup> | От 0,2 до 80       | 3,4   | 4,1   | 0,7  | 8,0   |
| Относительное амплитудное разделение, %                    | От 5,9 до 11       | 1,2   | 1,5   | 0,6  | 3,0   |

## 2. Метод измерений

Для измерения ОТХ сцинтилляционных блоков детектирования на установке «Спектр-1» применяется метод замещения, т. е. измеряются основные параметры спектров энергий гамма-излучения от образцовых спектрометрических источников гамма-излучения (ОСГИ) с помощью сцинтилляционного блока детектирования со встроенным источником высокого напряжения (БДС). Для получения значений ОТХ испытуемых блоков детектирования (БД<sub>и</sub>) последний подключают ко входу установки «Спектр-1» взамен БДС и уже с помощью БД<sub>и</sub> проводят аналогичные измерения спектров гамма-излучения.

Эффективность регистрации ионизирующего излучения детектором определяется как отношение числа электрических импульсов, зарегистрированных на выходе детектора в единицу времени, к числу частиц, попавших в детектор за то же время.

Метод измерений относительного амплитудного разрешения заключается в обработке информации, получаемой при регистрации спектрометром с сцинтилляционным блоком детектирования одной моноэнергетической линии ионизирующего излучения, и определении ширины пика полного поглощения на его полувысоте.

### 3. Подготовка к проведению измерений

Подготовку установки «Спектр-1» к измерениям проводят в соответствии с руководством по эксплуатации установки.

#### 3.1. Средства измерений

- Установка «Спектр-1», зав. № 01, зарегистрирована в Госреестре средств измерений под № 22383–02, диапазон регистрируемых энергий гамма-излучения от 50 до 3000 кэВ, диапазон размеров испытываемых на установке блоков детектирования по площади выходного окна от 0,7 до 80 см<sup>2</sup>.
- Источники фотонного излучения радионуклидные закрытые спектрометрические эталонные ОСГИ-3, зарегистрированы в Госреестре средств измерений под № 46383–11, диапазон номинальной активности радионуклида в источнике от 5 до 1000 кБк, доверительная относительная погрешность измерений активности радионуклида не более 3 % при доверительной вероятности  $P = 0,95$ .
- Термометр ртутный стеклянный ТЛ-2, зарегистрирован в Госреестре средств измерений под № 251–49, диапазон измерений температуры от 0 до 100 °С, цена деления 1 °С, абсолютная погрешность  $\pm 1$  °С.
- Барометр-анероид метеорологический БАММ-1, зарегистрирован в Госреестре средств измерений под № 5738–76, диапазон измерений атмосферного давле-

ния от 80 до 106 кПа, пределы допускаемой основной погрешности  $\pm 0,2$  кПа, пределы допускаемой дополнительной погрешности  $\pm 0,5$  кПа.

- Психрометр аспирационный МВ-4-М, зарегистрирован в Госреестре средств измерений под № 10069–96, диапазон измерений относительной влажности воздуха от 10 до 100 %, погрешность измерений относительной влажности не более 6 %.
- Дозиметр-радиометр ДРБП-03 в комплекте с выносным блоком детектирования БДГ-01, зарегистрирован в Госреестре средств измерений под № 16370–97, диапазон измерений энергий фотонного излучения от 0,05 до 3,0 МэВ с относительной погрешностью  $\pm 20$  %, диапазон измерений мощности амбиентного эквивалента дозы от 0,10 до 3000000 мкЗв/ч с относительной погрешностью  $\pm 10$  %.

Примечание: допускается применение других средств измерений (СИ) и стандартных образцов (СО) утвержденных типов с аналогичными или лучшими метрологическими и/или техническими характеристиками.

### **3.2. Требования безопасности, охраны окружающей среды. Требования к квалификации операторов**

Перед началом работы на установке «Спектр-1» оператор должен изучить руководство по эксплуатации установок и требования безопасности в соответствии с источником<sup>1</sup>.

При работе на установке «Спектр-1» с использованием источников фотонного излучения необходимо руководствоваться требованиями безопасности в соответствии с источниками<sup>2</sup>.

Во время работы необходимо контролировать уровень энергии фотонного излучения с помощью дозиметра-радиометра.

---

<sup>1</sup> Сцинтилляционные детекторы. 18 с.

<sup>2</sup> Основные санитарные правила... 78 с.; Нормы радиационной безопасности. 116 с.

К выполнению измерений на установке «Спектр-1» допускается оператор с квалификацией инженера-физика, изучивший руководство по эксплуатации, прошедший соответствующий инструктаж, ознакомленный с инструкциями по технике безопасности на рабочем месте, а также обученный приемам работы:

- со спектрометрической аппаратурой;
- с источниками питания высокого напряжения для детекторов ионизирующих излучений;
- с закрытыми радиоактивными источниками гамма-излучения.

### 3.3. Условия измерений

При выполнении измерений соблюдают следующие условия:

- температура окружающего воздуха, °C (23±5);
- допускаемое колебание температуры за время измерений, °C ±2;
- атмосферное давление, кПа (мм рт. ст.) от 84,0 до 106,7 (от 630 до 800);
- напряжение в сети, В 220;
- отклонение напряжения питания от номинального (220 В), не более, % ± 10;
- относительная влажность воздуха, % 60±20.

## 4. Выполнение измерений

### 4.1. Измерение эффективности регистрации гамма-излучения

1. Набирают спектр от радионуклида  $^{228}\text{Th}$  из комплекта ОСГИ-3 с целью градуировки по полуширине пиков и по энергиям. Режимы работы аппаратуры (усиление на УИС-02 и в АЦП) необходимо настроить так, чтобы энергетиче-



ский диапазон измерений соответствовал значениям от 50 до 3000 кэВ.

2. Проводят обработку спектра  $^{228}\text{Th}$ . Сохраняют полученные результаты градуировки по полуширине пиков и по энергиям вместе с файлом спектра  $^{228}\text{Th}$ .

3. Убеждаются, что регистрируемый диапазон энергий соответствует значениям от  $50 \pm 5$  до  $3000 \pm 200$  кэВ. Если указанное соответствие не соблюдается, проводят необходимые регулировки коэффициента усиления УИС-02 и уровней дискриминации АЦП.

Примечание: рекомендуется настроить таким образом, чтобы высокоэнергетичный пик  $^{228}\text{Th}$  — 2614 кэВ — соответствовал не более чем 900-му каналу АЦП.

После этого повторяют набор спектра от  $^{228}\text{Th}$  и проводят градуировки по полуширине пиков и по энергиям. Сохраняют полученные файлы с результатами обработки.

4. Удаляют все источники (радионуклиды) из комнаты, в которой проводятся измерения, и трехкратно проводят измерения спектра фона в течение не менее 10 мин. Сохраняют полученные файлы.

5. Устанавливая источник  $^{137}\text{Cs}$  из комплекта ОСГИ-3 последовательно на фиксированные расстояния от крышки детектора  $R_j$  ( $R_j = 5, 10, 15, 20, 30$  см;  $j = 1, 2, \dots, L$ , где  $L$  — число вариантов расстояний, в данном случае  $L = 5$ ), набирают гамма-спектры при помощи прикладной программы LSRM-32. Число импульсов, зарегистрированных в пике полного поглощения, соответствующего энергии 661,66 кэВ, должно быть не менее 2000 имп/с.

6. Рекомендуемое время набора каждого спектра 5 мин. При наборе спектра на расстоянии 30 см время набора следует увеличить до 10 мин.

7. Выполняют по три параллельных измерения в каждой точке по расстоянию ( $m = 3$ ).

## 4.2. Измерение относительного амплитудного разрешения

Метод основан на регистрации на установке «Спектр-1» спектра ионизирующего излучения от радионуклидов  $^{57}\text{Co}$  и  $^{137}\text{Cs}$  из комплекта ОСГИ-3 и определении ширины пика поглощения, соответствующего моноэнергетической линии  $^{137}\text{Cs}$  на его полувысоте.

1. Настраивают усиление на УИС-02 и в АЦП таким образом, чтобы центроида пика от гамма-источника  $^{137}\text{Cs}$  размещалась внутри диапазона 750–800 каналов анализатора.

2. Проводят набор спектра от источников  $^{57}\text{Co}$  и  $^{137}\text{Cs}$  таким образом, чтобы интегральная статистическая загрузка тракта регистрации составляла  $2000 \pm 200$  имп/с, а в максимуме пика гамма-линии 661,66 кэВ гамма-источника  $^{137}\text{Cs}$  было не менее 2000 имп/с. Набор спектра проводят 6 раз ( $N = 6$ ).

## 5. Обработка результатов измерений

### 5.1. Обработка результатов измерений эффективности регистрации гамма-излучения

1. Значение плотности потока гамма-излучения от точечного источника в телесный угол 4 стерадиан на расстоянии  $R$  от источника рассчитывают по формуле:

$$\Phi = \frac{K_t \cdot Q \cdot A}{4\pi(R + R_{\text{эфф}})^2}, \quad (3.1)$$

где  $K_t = \exp(-0,693 \cdot t/T_{1/2})$ ;

$T_{1/2}$  — период полураспада  $^{137}\text{Cs}$ ;

$t$  — время, прошедшее с момента аттестации источника;

$Q$  — активность источника (из свидетельства на  $^{137}\text{Cs}$  комплекта ОСГИ);

$A$  — относительная интенсивность линии гамма-излучения, отн. ед. (справочная характеристика: для линии 661,66 кэВ  $^{137}\text{Cs}$   $A = (0,851 \pm 0,004)$  отн. ед.);

$R_{\text{эфф}}$  — расстояние до эффективного центра детектора.

2. Значение  $R_{\text{эфф}}$  определяют следующим образом. При помощи прикладной программы LRSМ-32 сначала для каждого спектра определяют значение скорости счета импульсов (загрузки)  $n_{ij}$  при регистрации гамма-излучения от  $^{137}\text{Cs}$ . Затем для каждого расстояния  $j$  (для каждой группы из  $m$  измерений) рассчитывают среднее арифметическое значение скорости счета импульсов  $\overline{n_j}$  от  $^{137}\text{Cs}$  по формуле:

$$\overline{n_j} = \sum_{i=1}^m \frac{n_{ij}}{m}.$$

Аналогично по результатам регистрации спектров фонового излучения вычисляют среднее арифметическое значение скорости счета импульсов фона  $\overline{b}$ , после чего рассчитывают среднее арифметическое значение скорости счета сигнала по формуле:

$$\overline{a_j} = \overline{n_j} - \overline{b}.$$

Далее строят зависимость  $1/\sqrt{a}$  от расстояния  $R_j$ . Полученную зависимость аппроксимируют уравнением прямой (для аппроксимации рекомендуется использовать математический пакет Excel, операцию «добавить линию тренда»). Точка пересечения аппроксимирующей прямой с осью абсцисс и указывает искомое значение  $R_{\text{эфф}}$ .

3. Используя найденное значение  $R_{\text{эфф}}$ , рассчитывают величины эффективности регистрации гамма-излучения  $\xi_j$ , см<sup>2</sup>, для каждой точки  $j$  (соответствующей расстоянию  $R_j$ ) по формуле:

$$\xi_j = \frac{a_j}{\Phi_j},$$

где  $\Phi_j$  — плотность потока гамма-излучения на расстоянии  $(R_j + R_{\text{эфф}})$  от центра источника, вычисляемая по формуле (3.1).

4. Среднее значение эффективности регистрации гамма-излучения радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в диапазоне 50–3000 кэВ для точечной геометрии рассчитывают по формуле

$$\bar{\xi} = \frac{\sum_{j=1}^L \xi_j}{L}. \quad (3.2)$$

## 5.2. Обработка результатов измерений относительного амплитудного разрешения

1. Выполняют энергетическую градуировку спектрометрического тракта по известным табличным значениям энергий пиков радионуклидов  $^{57}\text{Co}$  ( $E = 122,06$  кэВ) и  $^{137}\text{Cs}$  ( $E = 661,66$  кэВ). Обработку проводят при помощи прикладной программы LSRM-32 (градуировка — линейная, т. к. осуществляется по двум точкам).

2. Определяют относительное амплитудное разрешение  $\eta$ , %, по гамма-линии радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  — 661,66 кэВ с помощью прикладной программы LSRM-32, в которой реализован алгоритм вычислений, регламентированный в ГОСТ 26874–86.

3. Рассчитывают среднее значение относительного амплитудного разрешения как среднее арифметическое по всем проведенным измерениям по формуле:

$$\bar{\eta} = \frac{\sum_{j=1}^N \eta_j}{N}. \quad (3.3)$$

## 5.3. Проверка приемлемости результатов параллельных измерений ОТХ

1. Диапазон в относительной форме  $(\xi_{\text{maxj}} - \xi_{\text{minj}})/\bar{\xi} \cdot 100$  результатов пяти измерений эффективности регистрации гамма-

излучения сопоставляют с критическим диапазоном  $CR_{0,95}$  (5), приведенным в табл. 3.2.

2. Диапазон в относительной форме  $(\eta_{\max j} - \eta_{\min j})/\bar{\eta} \cdot 100$  результатов шести измерений относительного амплитудного разрешения сопоставляют с критическим диапазоном  $CR_{0,95}$  (6), приведенным в табл. 3.2.

Таблица 3.2

| Определяемая ОТХ, единицы измерений                        | Диапазон измерений | Критический диапазон (относительное значение допускаемого расхождения между наибольшим и наименьшим из пяти (шести) результатов параллельных измерений), $CR_{0,95}$ (5) ( $CR_{0,95}$ (6)), % | Критический диапазон (относительное значение допускаемого расхождения между наибольшим и наименьшим из семи (восьми) результатов параллельных измерений), $CR_{0,95}$ (7) ( $CR_{0,95}$ (8)), % |
|--|--------------------|--|---|
| Эффективность регистрации гамма-излучения, см <sup>2</sup> | От 0,2 до 80       | 13   | 14  |
| Относительное амплитудное разрешение, %                    | От 5,9 до 11       | 4,8  | 5,2   |

3. В случае если диапазоны  $(\xi_{\max j} - \xi_{\min j})/\bar{\xi} \cdot 100$   $((\eta_{\max j} - \eta_{\min j})/\bar{\eta} \cdot 100)$  не превышают значения критических диапазонов  $CR_{0,95}$  (5) ( $CR_{0,95}$  (6)), результаты пяти (шести) параллельных измерений признают приемлемыми и за результаты измерений принимают средние арифметические значения, рассчитанные по формулам (3.2), (3.3).

4. Если диапазоны результатов  $(\xi_{\max j} - \xi_{\min j})/\bar{\xi} \cdot 100$   $((\eta_{\max j} - \eta_{\min j})/\bar{\eta} \cdot 100)$  пяти (шести) измерений превышают значения

критических диапазонов  $CR_{0,95}$  (5) ( $CR_{0,95}$  (6)), необходимо получить еще два результата измерений в условиях повторяемости на том же детекторе в соответствии с параграфом «Выполнение измерений» (с. 54).

5. Если диапазоны результатов  $(\xi_{\max j} - \xi_{\min j})/\bar{\xi} \cdot 100$  ( $(\eta_{\max j} - \eta_{\min j})/\bar{\eta} \cdot 100$ ) семи (восьми) измерений не превышают значения критических диапазонов  $CR_{0,95}$  (7) ( $CR_{0,95}$  (8)), то результаты семи (восьми) измерений признают приемлемыми и за результаты измерений принимают средние арифметические значения, рассчитанные по формулам (3.2), (3.3).

6. Если диапазоны результатов  $(\xi_{\max j} - \xi_{\min j})/\bar{\xi} \cdot 100$  ( $(\eta_{\max j} - \eta_{\min j})/\bar{\eta} \cdot 100$ ) семи (восьми) измерений превышают значения критических диапазонов  $CR_{0,95}$  (7) ( $CR_{0,95}$  (8)), то за результат измерений принимают медиану результатов семи (восьми) измерений.

## 6. Оформление результатов измерений

Результаты измерений эффективности регистрации гамма-излучения и относительного амплитудного разрешения представляют в виде:

$\xi$ , см<sup>2</sup>;  $\delta_L(\xi) = 8,0\%$ ;  $P = 0,95$ ;  $L = 5$  ( $L = 7$ );

$\eta$ , %;  $\delta_L(\eta) = 3,0\%$ ;  $P = 0,95$ ;  $N = 6$  ( $N = 8$ ),

где  $\xi$  — результат измерений эффективности регистрации гамма-излучения, рассчитанный по формуле (3.2), либо медиана по п. 6 на странице выше;

$\eta$  — относительное амплитудное разрешение, рассчитанное по формуле (3.3), либо медиана по п. 6 на странице выше.

Наименьший разряд числового значения определяемого показателя принимают таким же, как и наименьший разряд числового значения границ абсолютной погрешности измерений, рассчитанного по формуле (3.4).

Границы абсолютной погрешности измерений определяемого показателя  $\Delta_L$  рассчитывают по формуле

$$\Delta_L = \frac{\delta_L}{100} \cdot \xi(\eta) \quad (3.4)$$

и представляют числом, содержащим две значащие цифры.

## Содержание отчета

Студенты, проходящие лабораторный практикум по курсу «Методы и системы обнаружения делящихся материалов», представляют по лабораторной работе краткий аннотированный отчет (один на бригаду), который должен в сжатой форме содержать:

- название и цель работы;
- устройство и физические принципы работы сцинтилляционного детектора;
- схему и основные особенности работы гамма-спектрометра;
- первичные результаты измерений основных технических характеристик (ОТХ) блока детектирования сцинтилляционного спектрометрического;
- результаты обработки первичных данных и результаты определения погрешности измерений;
- выводы по результатам измерений в соответствии с параграфом «Оформление результатов измерений».

---

# Лабораторная работа № 4

## Носимый радиационный монитор (НОРМ)

---

### Введение

Цели работы:

- Изучение устройства прибора НОРМ и особенностей его эксплуатации при обследовании территорий.
- Приобретение навыков работы с программным обеспечением, предназначенным для обработки и накопления результатов обследования.
- Решение задач по обследованию территорий.

Подготовку к настоящей лабораторной работе рекомендуется начать с просмотра видеофильма (он длится 16 мин). После этого просмотреть заголовки и первые абзацы основных разделов ИУП. Особое внимание уделить вопросам:

- состав комплекса СРК;
- состав прибора НОРМ;
- детектор, примененный в приборе НОРМ: принцип работы и особенности конструкции;
- основные задачи, решаемые с помощью прибора НОРМ.

Более подробное изучение НОРМ, программы управления, установленной на центральном компьютере, а также освоение основных методов работы предполагается выполнять



после коллоквиума в ходе выполнения лабораторной работы на кафедре.

Необходимо также изучить основы теории обнаружения, изложенные в лабораторной работе № 1. Рекомендуется внимательно изучить при подготовке параграф «Алгоритм обнаружения в режиме «Неподвижный».

Современная система радиационного контроля должна представлять собой комплексное решение проблем поиска и обнаружения источников ионизирующего излучения<sup>1</sup>. Опыт эксплуатации комплексов радиационного контроля «Соратник-01» и «ПАК-1У» привел к пониманию необходимости включения в существующую аппаратно-программную структуру подобных систем дополнительного носимого устройства, расширяющего их функциональные возможности и позволяющего вести обследование радиационной обстановки в недоступных для проезда местах. С целью обеспечения выполнения обследования было разработано устройство, названное носимым радиационным монитором (НОРМ).

## Описание и принцип работы прибора

Основные технические характеристики НОРМ:

- Диапазон энергий регистрируемого гамма-излучения 0,05–3,0 МэВ.
- Минимальная регистрируемая активность гамма-источника  $^{137}\text{Cs}$  на расстоянии 15 м при скорости движения источника со скоростью не более 0,5 м/с, при вероятности ложных тревог не более 0,05 составляет  $Q_{\min} = 0,075$  мкКи.
- Потребляемая мощность не более 4,5 Вт.

---

<sup>1</sup> Мобильные комплексы радиационного контроля: сборник научных разработок / под ред. проф. Б. В. Шульгина и А. В. Кружалова. Екатеринбург : УрФУ, 2011. 137 с.; Пат. 2140660 Рос. Федерация; Пат. 2242024 Рос. Федерация; Пат. 2456638 Рос. Федерация.

- Максимальное время непрерывной работы (без подзарядки аккумулятора) не менее 6 ч.
- Масса прибора (вместе с аккумулятором) не более 10,5 кг.
- Дальность связи по радиоканалу 250–400 м.

Носимый радиационный монитор — компактный высокочувствительный прибор, предназначенный для поиска источников гамма-излучения в труднодоступных местах. Прибор НОРМ отличается высокой чувствительностью: порог регистрации гамма-излучения от  $^{137}\text{Cs}$  составляет  $Q_{\min} = 65$  кБк, что соответствует, по ГОСТ Р 51635–2000, носимому РМ первой категории. Прибор оснащен спутниковой навигационной системой (СНС), радиоканалом для связи с центральным компьютером и упакован в заплечный станковый рюкзак для переноски оператором. Во время проведения обследования НОРМ управляется интеллектуальным модулем ИМУ и не требует участия оператора, контролирующего только минимальный набор параметров работоспособности (превышения порога безопасности по МЭД, состояние детектора, положение спутников, степень заряда аккумулятора питания). Данные о скорости счета гамма-излучения, текущие координаты и скорость движения сохраняются в памяти прибора и передаются в центр управления, где обрабатываются высокоэффективными алгоритмами обнаружения источников гамма-излучения. (Используемые алгоритмы обработки сигналов от детекторов описаны в лабораторной работе № 1).

Для сопоставления в табл. 4.1 приведены пороги регистрируемой активности для аналогичных приборов, в которых можно использовать сцинтилляционный детектор на основе кристалла NaI-Tl размерами  $\varnothing 63 \times 63$  мм и  $\varnothing 100 \times 100$  мм. Из таблицы видно, что по порогу обнаружения детекторы на основе даже сравнительно большого по размерам кристалла NaI-Tl существенно проигрывают описываемому прибору. Следует отметить, что при увеличении размеров кристалла

NaI-Tl резко ухудшаются параметры механической и температурной прочности, а также существенно возрастает стоимость прибора.

Таблица 4.1

| Сцинтилляционный детектор на основе   | $Q_{\min 1}$ ,<br>МБк (мкКи) | $Q_{\min 2}$ ,<br>кБк (мкКи) | Категория<br>носимого РМ,<br>по ГОСТ Р 51635–<br>2000 |
|---|------------------------------|------------------------------|---|
| полистирола с добавкой РОРОР размерами $25 \times 13 \times 3,5 \text{ см}^3$ | 2,8 (75)                     | 70 (1,9)                     | I   |
| кристалла NaI-Tl размерами $\varnothing 100 \times 100 \text{ мм}$            | 7 (190)                      | 160 (4,3)                    | II  |
| кристалла NaI-Tl размерами $\varnothing 63 \times 63 \text{ мм}$              | 11 (300)                     | 270 (7,3)                    | III   |

В таблице приняты следующие обозначения:

$Q_{\min 1}$  — минимальная регистрируемая активность гамма-источника  $^{137}\text{Cs}$  при скорости движения источника со скоростью не более 0,5 м/с, расстоянии 15 м, вероятности ложных тревог не более 0,05;

$Q_{\min 2}$  — минимальная регистрируемая активность гамма-источника  $^{137}\text{Cs}$  на расстоянии 1 м при тех же исходных параметрах контроля. (Пороги для расстояния 1 м ( $Q_{\min 2}$ ) в табл. 4.1 рассчитаны с целью определения категории носимого РМ в соответствии с ГОСТ Р 51635–2000).

Общий вид прибора НОРМ показан на рис. 4.1.

В состав прибора входят:

- 1) блок детектирования;
- 2) интеллектуальный модуль управления (ИМУ);
- 3) станковый рюкзак;
- 4) антенна канала радиосвязи (433 МГц);
- 5) антенна СНС;
- 6) выносной пульт управления;
- 7) крышка ИМУ;
- 8) жидкокристаллический индикатор.



Рис. 4.1. Общий вид прибора НОРМ (без переносного компьютера)

Кроме перечисленных узлов и компонентов, изображенных на рис. 4.1, в состав НОРМ входят также компьютер портативный типа HP 6570b ProBook с установленным прикладным программным обеспечением SFG\_NORM, блок связи с антенной радиоканала, антенна и устройство для зарядки аккумулятора.

Основой прибора НОРМ является блок детектирования (БД) гамма-излучения сцинтилляционный, предназначенный для преобразования потока гамма-квантов в электрические сигналы. В сцинтилляционном пластиковом детекторе гамма-кванты преобразуются в короткие световые вспышки, которые далее с помощью ФЭУ, приклеенного оптическим клеем к сцинтиллятору, преобразуются в электрические импульсные сигналы. Последние после усиления и формирования в усилителе-формирователе УФ поступают на счетный вход микропроцессора.

ИВН предназначен для преобразования постоянного напряжения +12 В в высокое напряжение (порядка 1400 В), необходи-

мое для питания ФЭУ. Высокое напряжение поступает на электроды ФЭУ через делитель напряжения ДН.

Аккумуляторная батарея (АБП) обеспечивает автономное электропитание всех электронных компонентов прибора НОРМ.

Центром управления прибора НОРМ является интеллектуальный модуль управления ИМУ на базе микроконтроллера AT91SAM7SE256 фирмы ATMEL. Согласно алгоритмам, реализованным в программном обеспечении ИМУ, происходит управление процедурой измерения скорости счета гамма-излучения, обеспечивается посекундная синхронизация информации с данными от приемника СНС, формируются записи в локальную базу данных, а также передача результатов измерений в базу данных центра управления в ответ на запрос, полученный средствами радиоканала или канала связи RS485.

Выносной пульт управления (ВПУ) предназначен для быстрого (оперативного) управления работой НОРМ при использовании прибора по основному назначению — при поиске ИИИ.

Жидкокристаллический индикатор (ЖКИ) имеет чисто технологические функции, т. е. обеспечивает удобство эксплуатации прибора НОРМ.

Назначение антенны СНС и антенны радиоканала понятны из их названий.

Структурная схема прибора приведена на рис. 4.2.

Основные компоненты прибора НОРМ, размещенные на схеме:

- БД — блок детектирования гамма-излучения, который в свою очередь содержит:
  - сцинтилляционный пластиковый детектор размера  $25 \times 13 \times 3,5$  см<sup>3</sup>;
  - фотоэлектронный умножитель (ФЭУ);
  - делитель напряжения (ДН).
- УФ — усилитель-формирователь.

- АБП — аккумуляторная батарея автономного электропитания (Delta, тип DTM-12045 12V, 4,5 Ah).
- ИВН — источник высокого напряжения.
- ИМУ — интеллектуальный модуль управления, в составе:
  - микроконтроллер AT91SAM7SE256;
  - СНС — приемник спутниковой навигационной системы;
  - радиомодем РМД400–1;
  - набор элементов энергонезависимой памяти (FLASH и FRAM память);
  - модуль «часы-календарь»;
  - модуль интерфейса RS485;
  - модуль интерфейса USB.
- ВПУ — выносной пульт управления.
- ЖКИ — жидкокристаллический индикатор.
- А1 — антенна СНС.
- А2 — антенна радиоканала.

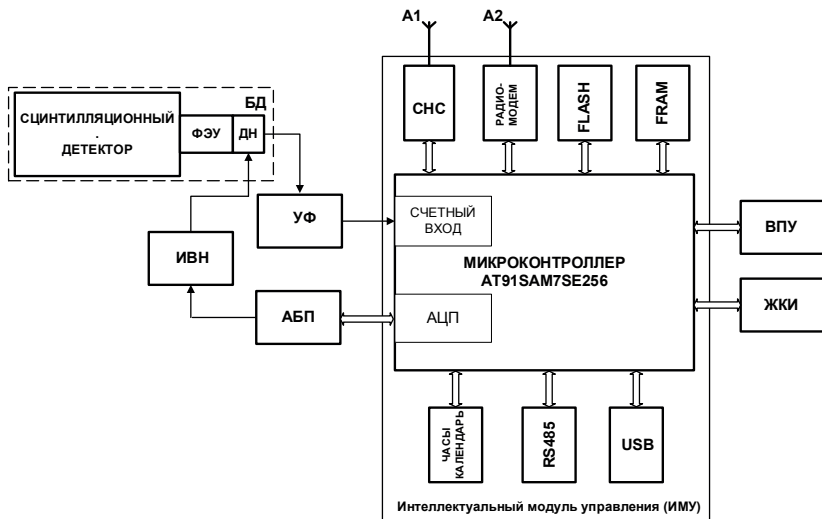


Рис. 4.2. Структурная схема прибора

## Блок детектирования

Блок детектирования сцинтилляционный включает в свой состав собственно детектор, фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) и делитель напряжения (ДН) для питания ФЭУ.

Основное назначение детектора — преобразование гамма-квантов в короткие световые вспышки (сцинтилляции). В используемом пластмассовом детекторе длительность сцинтилляции не превышает 5 нс.

Детектор представляет собой прозрачную пластмассу на основе полистирола с добавкой активатора (*p*-терфенил) и т. н. смесителя спектра (РОРОР) для согласования спектра световой вспышки со спектральной чувствительностью фотокатода ФЭУ.

Пластмассовый детектор изготавливается в форме прямоугольного параллелепипеда ( $25 \times 13 \times 3,5$  см<sup>3</sup>) с полированными поверхностями. Для обеспечения качественного светособирания от сцинтилляционной вспышки детектор снабжается зеркальным отражателем.

К торцу детектора приклеен ФЭУ, в котором световые вспышки преобразуются в электрические импульсные сигналы. В приборе НОРМ используется ФЭУ фирмы Hamamatsu типа R-580—17, отличающиеся высокой чувствительностью и помехозащищенностью. Питание на электроды ФЭУ подается от ИВН через резистивный делитель напряжения (ДН). ИВН обеспечивает питание ФЭУ напряжением порядка 1400 В. В качестве ИВН используется DC—DC-преобразователь фирмы Traco Power PHV 12—2.0K 2500P. Модуль допускает изменение входного напряжения от 10,8 до 16,5 В при выходном напряжении до 2000 В и токе нагрузки до 2,5 мА. Выходное напряжение имеет положительную полярность.

С выхода блока детектирования импульсы передаются по кабелю на вход усилителя-формирователя (УФ). Усилитель-формирователь (УФ) обеспечивает усиление сцинтиимпульсов, поступающих с анода ФЭУ, и формирование из них счетных

импульсов, нормированных по амплитуде (12 В) и длительности (1 мкс). УФ содержит настраиваемый дискриминатор нижнего уровня (ДНУ) для защиты от шумов.

### **ИМУ прибора НОРМ**

Интеллектуальный модуль управления является «центром управления» прибора НОРМ. ИМУ разработан на базе микроконтроллера AT91SAM7SE256 фирмы ATMEL.

Ниже перечислены дополнительные электронные компоненты, входящие в состав ИМУ, и их основное назначение:

- Приемник спутниковой навигационной системы (СНС), предназначенный для определения текущего местоположения прибора в пространстве. Применен приемник фирмы Trimble — Lassen iQ GPS.
- Радиомодем РМД400—1 в OEM-варианте (в виде встраиваемого модуля) предназначен для обмена данными с центром обработки информации при работе прибора под внешним управлением.
- Модуль интерфейса RS485. Используется для работы прибора в составе комплекса радиационного контроля (например, в составе портального радиационного монитора на КПП).
- Модуль интерфейса USB. Необходим для оперативной передачи информации, накопленной в автономной памяти прибора, на центральный компьютер.
- Модуль «часы-календарь» — для синхронизации измерений во времени.
- Набор элементов энергонезависимой памяти (FLASH и FRAM-память). Предназначен для сохранения получаемой в ходе работы информации.

Интеллектуальный модуль управления снабжен специальным программным обеспечением для управления процедурами измерения и обеспечения синхронной посекундной записи результатов измерений (скорости счета детектора гамма-излуче-



ния с координатами точки измерения, получаемыми от СНС) как в локальную энергонезависимую память, так и в базу данных центра управления по радиоканалу или по каналу связи RS485.



Рис. 4.3. Интеллектуальный модуль управления

Модуль управления имеет простейший интерфейс для взаимодействия с оператором. На ЖКИ отображается текстовое меню и оперативная информация о текущем состоянии, а навигация по меню и исполнение команд осуществляется с помощью кнопок на панели управления:

- Кнопка 1 (левая) — вверх по меню.
- Кнопка 2 (средняя) — исполнение.
- Кнопка 3 (правая) — вниз по меню.

Меню имеет следующий вид:

- Измерение:
  - Старт — запустить измерение.
  - Стоп — остановить измерение.
  - Возврат — возврат в меню верхнего уровня.
- Тест:
  - Детектор — на ЖКИ отображается текущая скорость счета.
  - Контроль ВПУ — тест световых индикаторов пульта и звукового сигнала.
  - АБП — измеряется напряжение аккумулятора.

- Память — выводится степень заполнения памяти в процентах и количество записанных файлов с измерениями.
- Возврат — в меню верхнего уровня.
- Настройки:
  - Интервал измерения — выбирается интервал 0,5, 1 с.
  - Длительность серии — задается время одной серии измерения в секундах.
  - Порог АБП — задается минимальное значение напряжения аккумулятора.
  - Порог МЭД — значения МЭД для включения сигнала тревоги.
  - Коэффициент МЭД — задается коэффициент для расчета МЭД.
  - Дата — установка текущей даты.
  - Время — актуальное время.
  - Часовой пояс.
  - Возврат.

ЖКИ-индикатор оснащен подсветкой для работы при плохом освещении. В целях экономии энергии после 10 с простоя дисплей переходит в состояние ожидания с отключением подсветки. Из состояния ожидания ЖКИ выводится нажатием любой кнопки, при этом дисплей переводится в активный режим и включается подсветка.

Интервал измерения — временной интервал одного отсчета, в течение которого происходит подсчет импульсов от БДП.

Длительность серии — продолжительность одной серии измерения.

Порог АБП — порог напряжения заряда аккумуляторов, при достижении которого прибор начинает выдавать звуковое предупреждение пользователю. Частота звуковых импульсов растет по мере разряда АБП.

Порог МЭД — максимально допустимый порог МЭД, по превышении которого прибор выдает пользователю тревожное сообщение и включает звуковой сигнал.

## Выносной пульт управления (ВПУ)



Рис. 4.4. ВПУ

ВПУ предназначен для оперативного контроля и управления прибором. Во время работы прикрепляется к лямке рюкзака так, чтобы он находился в поле зрения оператора. На выносном пульте управления расположены три световых индикатора (красный и два зеленых) и одна кнопка. Кнопка используется для пуска и остановки измерения. При нажатии данной кнопки во время измерения текущее измерение сохраняется во флэш-памяти прибора с внесением всех требуемых изменений в архитектуру применяемой файловой системы (количество файлов, длина «записи» и т.д.). Таким образом, пользователь может принудительно сохранить последнюю серию измерений (например, перед заменой аккумулятора).

Световые индикаторы отражают текущее состояние прибора следующим образом:

|  |   |
|--|---|
| Зеленый индикатор № 2 горит постоянно        | Включено питание прибора  |
| Красный индикатор № 1 мигает с частотой 1 Гц | Есть связь с GPS. Количество спутников недостаточно для определения координат (меньше трех спутников) |

|   |   |
|---|---|
| Красный горит постоянно<br>Слышен звуковой сигнал | Ошибка прибора или сигнал тревоги. Источник ошибки выводится на ЖКИ |
| Зеленый индикатор № 3 мигает с частотой 1 Гц      | Запущен процесс измерения. Штатный режим                            |
| Зеленый индикатор № 3 погашен                     | Измерение остановлено   |

## Порядок выполнения лабораторной работы

1. Лабораторная работа начинается с коллоквиума, на котором подробно обсуждаются вопросы, изложенные во введении (с. 62).
2. Включается прибор и выполняются контрольные проверки по пункту меню «Тест».
3. Выполняется пробное измерение с проверкой записи результата во внутреннюю память прибора.
4. Выполняется обход обследуемой территории по заданному маршруту.
5. Выполняется считывание данных, накопленных во время обхода в базе данных центрального компьютера.
6. Выполняется обработка полученных данных с целью решения задачи обнаружения источников гамма-излучения и уточнения их местоположения.
7. Составляется отчет о проделанной работе.

## Содержание отчета

Студенты представляют по проделанной лабораторной работе краткий аннотированный отчет (один на бригаду), который должен в сжатой форме содержать:

- название и цель работы;
- состав прибора НОРМ и назначение основных компонентов, входящих в его состав;
- описание порядка подготовки прибора к работе и хода обследования заданной территории;
- формулировку кратких выводов по результатам выполнения работы с критическими замечаниями о работе прибора и программного обеспечения;
- необходимый иллюстративный материал с результатами решения задач обнаружения и фиксации местоположения ИИИ; по каждому случаю обнаружения требуется представить краткий комментарий, по наиболее впечатляющим — объяснения и выводы.

---

# Лабораторная работа № 5

Комплекс СРК «Соратник-01». Изучение устройства и особенностей эксплуатации.

Решение задач обнаружения  
и идентификации ИИИ

---

## Введение

Цели работы:

- Изучение устройства и особенностей эксплуатации комплекса СРК «Соратник-01».
- Овладение основами теории и методов решения задач обнаружения ИИИ средствами комплекса СРК.
- Овладение методами решения задач идентификации радионуклидов по гамма-спектрам при помощи программы LSRM-USTU.

Наиболее полно вопросы устройства и особенностей эксплуатации комплекса СРК «Соратник-01» изложены в документе «Комплекс СРК «Соратник-01 К4310»: руководство по эксплуатации»<sup>1</sup>. Однако поскольку «Руководство по эксплуатации...» написано в соответствии со старыми гостами и с ним непро-

<sup>1</sup> Путь к документу: С:/УПО-01/Эксплуатац\_Докум\_Соратник-01 — файлы «РЭ1-К4310–3.05» и «РЭ2-К4310».

сто работать, для ознакомительного этапа обучения персонала было создано «Учебное программное обеспечение УПО-01»<sup>1,2</sup>.


УПО-01 состоит из трех независимых фрагментов, запускаемых после открытия общего диалогового окна при помощи



иконки Soratnik:

- Интерактивное учебное пособие (ИУП).
- Тренажер-имитатор.
- Видеофильм.

ИУП может запускаться либо из диалогового окна УПО-01,

либо непосредственно при помощи иконки  Help, выведенной на рабочий стол учебного компьютера. ИУП представляет собой специальную электронную книгу, предназначенную для изучения комплекса, которая содержит подробные сведения о комплексе СРК и способах решения основных задач, выполняемых аппаратными и программными средствами комплекса. ИУП выполнен в форме \*.html-текстов и поясняющих рисунков; ИУП имеет внутренние интерактивные связи. В состав ИУП включены также руководства для оператора для всех прикладных программ, используемых в комплексе СРК «Соратник-01» (см. в закладке «Приложения»).

При подготовке к настоящей лабораторной работе необходимо:

- Вспомнить основы теории обнаружения. Предлагается ответить на контрольные вопросы, изложенные в ИУП, п. 7 раздела «Учебно-тренировочные задачи/Работа с центральной ЭВМ (ЦЭВМ) комплекса СРК «Соратник-01»/Обнаружение неподвижного источника нейтронного излучения с помощью комплекса «Со-

<sup>1</sup> УПО-01 установлено на диске С учебного компьютера.

<sup>2</sup> УПО-01 написано для офицеров, подготавливаемых к обслуживанию комплекса, и для курсантов военных училищ. Часто встречающееся в текстах УПО-01 слово «курсант» авторы просят читать как «студент».

ратник-01» (данные вопросы приводятся также в лабораторной работе № 1).

- Изучить основные разделы документа «Прикладное программное обеспечение «Соратник-01». Руководство оператора». Особое внимание уделить изучению структуры указанного ППО, назначению входящих в состав ППО «Соратник-01» подпрограмм.
- Изучить основные разделы документа «Прикладное программное обеспечение LSRM\_UGTU. Руководство оператора» (в частности, уяснить назначение программы, основные задачи, решаемые с помощью этой программы). Особо тщательно изучить раздел «Идентификация радионуклидов и расчет активности точечного источника».

К коллоквиуму требуется вспомнить основные термины из области сцинтилляционной техники и гамма-спектрометрии (можно по ИУП: раздел «Приложения», п. 8). Кроме того, необходимо подготовить ответы на вопросы, изложенные в ИУП, п. 7: «Учебно-тренировочные задачи/Работа с центральной ЭВМ (ЦЭВМ) комплекса СРК «Соратник-01»/Задача № 3 «Идентификация источника гамма-излучения».

Детальное ознакомление с программой LSRM\_UGTU и освоение основных приемов работы с ней предполагаются в ходе выполнения лабораторной работы.

## Порядок выполнения лабораторной работы

1. Рекомендуется начать с просмотра видеофильма (длительность — 16 мин). После этого просмотреть заголовки и первые абзацы основных разделов ИУП. Особое внимание уделить вопросам:

- Состав комплекса СРК.
- Какие режимы питания используются в комплексе РК.



- Какие детекторы используются в комплексе РК; принцип работы и особенности конструкции.
  - Основные задачи, решаемые с помощью аппаратных и программных средств комплекса.
2. Выполняются учебно-тренировочные задачи из ИУП, с 1 по 6 и 8, из раздела «Имитация включения/выключения, переключения режимов работы комплекса «Соратник-01». (Задачу 7 рекомендуем исключить.)
3. Выполняются учебно-тренировочные задачи из ИУП 1 и 2, из раздела «Работа с центральной ЭВМ (ЦЭВМ) комплекса СРК «Соратник-01»: повторные обработки данных, полученных при проведении реальных измерений с помощью комплекса СРК «Соратник-01», с целью решения задачи обнаружения нейтронного излучения для различных ситуаций путем задания измененных параметров обработки. Последовательность выполнения указанных работ 1 и 2 и все подробности изложены в ИУП, в соответствующих вкладках.
4. Выполняется учебно-тренировочная задача 3 «Идентификация источника гамма-излучения». Последовательность выполнения указанной работы (задачи) и все подробности изложены в ИУП, в соответствующей вкладке.

## Содержание отчета

Студенты представляют по проделанной лабораторной работе краткий аннотированный отчет (один на бригаду), который должен в сжатой форме содержать:

- название и цель работы;
- состав комплекса СРК и назначение основных устройств, входящих в комплекс;
- краткие выводы по результатам выполнения учебно-тренировочных задач из ИУП, с 1 по 6 и 8, из раздела «Ими-

тация включения/выключения, переключения режимов работы комплекса «Соратник-01»;

- таблицы с результатами решения задач обнаружения при выполнении учебно-тренировочных задач из ИУП 1 и 2, из раздела «Работа с центральной ЭВМ (ЦЭВМ) комплекса СРК «Соратник-01»: по каждому случаю представить краткий комментарий, по наиболее запоминающимся случаям — объяснения и выводы;
- результаты обработки спектров, копии экрана с не менее чем тремя обработанными спектрами и соответствующие протоколы по результатам решения задач идентификации радионуклидов.

---

# Лабораторная работа № 6

## Измерение основных технических характеристик детекторов нейтронов

---

### Введение

Цели работы:

- Изучение физических принципов работы детекторов нейтронного излучения на основе  $^3\text{He}$ -счетчиков.
- Изучение прикладных вопросов выполнения измерений с использованием упомянутых детекторов.
- Ознакомление с метрологическими аспектами проведения измерений основных технических характеристик (ОТХ) блоков детектирования сцинтилляционных спектрометрических.
- Выполнение измерений ОТХ детекторов нейтронного излучения с оценкой погрешности результатов измерений.

Лабораторная работа выполняется в соответствии с документом «Методика измерений эффективности регистрации нейтронов детекторами нейтронов на стенде» (МВИ 5/95), разработанным на кафедре экспериментальной физики УрФУ и аттестованным Федеральным государственным унитарным предприятием «Уральский научно-исследовательский институт метрологии» (ФГУП «УНИИМ») 09.12.95.

Важно особо подчеркнуть, что разработка и аттестация методики выполнения измерений были важнейшими этапами создания метрологического обеспечения производства детекторов нейтронного излучения. Безусловно, не менее важными являлись разработка и создание образцовой установки «Стенд для измерения эффективности регистрации нейтронов детекторами нейтронов», ее метрологическая аттестация и периодическая поверка органами «Росстандарта».

Перед выполнением лабораторной работы студенты должны ознакомиться с «Техническим описанием и инструкцией по эксплуатации стенда (установки) для измерения эффективности регистрации нейтронов детекторами нейтронов» (ТО), в котором изложены технические характеристики, устройство и принцип действия, а также правила эксплуатации установки (файл «ТО\_Детекторы\_Нейтр» прилагается).

Кроме того, студенты должны вспомнить:

- основные термины по технике детектирования нейтронного излучения и их физический смысл;
- основные термины и понятия из метрологии, а также теории вероятностей (в частности, что такое среднее арифметическое значение, медиана, среднее квадратичное отклонение (СКО), законы распределения случайных величин).

Обязательным является также предварительное изучение и соблюдение правил радиационной безопасности при работе с источниками ионизирующих излучений в соответствии с источниками <sup>1</sup>.

Измерения эффективности регистрации нейтронов детекторами нейтронов типа МРДИ-01 (ДИН) проводятся на измерительном стенде. Эффективность регистрации нейтронов (ЭРН) численно равна отношению средней частоты следования импульсов, измеренной на выходе детектора, к плотности потока нейтронов, падающих на поверхность детектора.

---

<sup>1</sup> Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности. 78 с.; Нормы радиационной безопасности. 116 с.

Методика выполнения измерений обеспечивает выполнение измерений эффективности регистрации нейтронов с относительной погрешностью, не превышающей 13 %, при доверительной вероятности  $P = 0,95$ .

## 1. Средства измерений и вспомогательные устройства

Измерительный стенд (установка), в состав которого входят:

- Источник нейтронного излучения (ИНИ) типа НК252М11.16 на основе радионуклида калифорний-252 ( $^{252}\text{Cf}$ ); основные параметры ИНИ (поток нейтронов от источника, дата аттестации) берутся из паспорта на источник. Погрешность измерения потока нейтронов не более 10 %. Средняя энергия нейтронов 2,13 МэВ. Период полураспада 2,64 года.
- Измерительная линейка (рулетка), обеспечивающая измерение расстояния в диапазоне до 20 м с ценой деления 5 мм.
- Экранирующий усеченный конус из борированного полиэтилена длиной 400 мм по ГОСТ 8.355—79.
- Передвижная платформа для установки источника нейтронов в рабочее положение, снабженная манипуляторами. С помощью манипуляторов осуществляются безопасное и удобное перемещение источника нейтронов из защитного контейнера в рабочее положение на линию визирования (на высоту 6,00 м по отношению к полу), повороты ИНИ вокруг своей оси, а также установка (или, при необходимости, удаление) экранирующего конуса на линию (с линии) визирования.
- Защитный контейнер для источника нейтронов. Обеспечивает ослабление потока нейтронов от источника ИНИ до значения, соответствующего на расстоянии 1 м

от поверхности контейнера поглощенной дозе не более 80 мкбЭР/ч по нейтронному излучению и не более 60 мкбЭР/ч по гамма-излучению.

- Частотомер электронносчетный типа ЧЗ–34\*. Диапазоны регистрируемых частот: 0,1; 1; 10; 100 Гц; 1; 10; 100 кГц; 1, 10 МГц в импульсном режиме; 5, 10, 50 МГц (синусоидальные). Входной импульсный сигнал от 0,1 до 400 В. Нестабильность частоты внутреннего кварцевого генератора  $\pm 2 \cdot 10^{-5}$  через 30 мин после включения. Выходные импульсные сигналы: частота от 0,1 Гц до 10 МГц, амплитуда  $\geq 1 \sim \text{В}$ .
- Генератор импульсов типа Г5–54\*. Выход основной: длительность импульсов от 0,5 до 1000 мкс. Нестабильность длительности  $< 3 \%$ . Длительность фронта импульсов 50 и 100 нс. Амплитуда импульсов на нагрузке 500 Ом от  $5 \cdot 10^{-4}$  до 50 В. Погрешность установки амплитуды 0,1U. Частота повторения импульсов от 0,01 до 100 кГц. Погрешность установки частоты  $< 0,1f$ ; нестабильность частоты за 1 ч работы  $< 3 \%$ .
- Осциллограф типа С1–65\*.
- Персональный компьютер\* типа IBM PC в следующей комплектации:
  - процессор — не менее 386SX, 40 МГц;
  - оперативная память 2 Мб;
  - дисплей цветной VGA;
  - накопитель на жестком магнитном диске 220 Мб;
  - дисковод гибких магнитных дисков (3,5" или 5,2");
  - русифицированная клавиатура;
  - имеются два последовательных порта ввода-вывода;принтер.
- Блоки и узлы сопряжения ПЭВМ с детектором нейтронов и с генератором импульсов\*: блок сопряжения МРБС-03 (ГВАТ. 467316.001), блок коммутационный МРКУ-03 (ГВАТ. 468361.001).

- Блок питания МРБП, обеспечивающий питание 27 В для блока МРБС и для ДИН (ДЕ2.087.131).
- Прикладное программное обеспечение TESTDIN\*, работающее в операционной среде MS DOS, версия от 30.05.95, и соответствующее базовое ПО — операционная система MS DOS, версия 6.22. Текст программы на магнитных носителях.
- Техническое описание и инструкция по эксплуатации стенда (с комплектом схем и руководством оператора по работе с ПО).
- Технические описания и инструкции по эксплуатации к блокам и приборам, входящим в состав стенда.

Вместо приборов и компонентов, помеченных знаком \*, допустимо применение других типов приборов с аналогичными параметрами. Допустимо также применение другого (модернизированного) компьютера IBM PC, и соответственно, других устройств сопряжения детектора МРДИ или ДИН с компьютером и другого программного обеспечения.

Детекторы типа МРДИ-01 (ДЕ 2.204.003) или ДИН (аналогичный по конструкции и техническим характеристикам детектору МРДИ-01) не входят в состав стенда. Однако указанные детекторы используются при аттестации и поверках стенда, а также в качестве аттестуемых на стенде приборов.

Вспомогательные устройства:

- Термометр по ГОСТ 2045.
- Барометр по ГОСТ 6359.
- Психрометр по ГОСТ 6353.
- Радиометр нейтронов типа МКС-01 Р по ГОСТ 28271. Диапазон измерений по  $\gamma$ -излучению от 1 до  $3,10^5$  мкбэр/ч, погрешность  $\leq 20\%$ . Диапазон измерений плотности потока нейтронов от  $10^{-4}$  до  $3,10^8$  н/(м<sup>2</sup> с); погрешность  $\leq 30\%$ .

## 2. Требования безопасности

Работы на стенде следует проводить в соответствии с требованиями безопасности основных санитарных правил работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений — ОСПОРБ-99/2010<sup>1</sup>, нормами радиационной безопасности — НРБ-99/2009<sup>2</sup>, а также правилами радиационной и электробезопасности, указанными в техническом описании и инструкции по эксплуатации стенда<sup>3</sup>.

Работы на стенде должны проводить лица, допущенные медицинскими органами к работе с источниками ионизирующего излучения. Также к выполнению измерений на стенде допускаются лица, имеющие высшее или среднее специальное образование, практический опыт работы по измерению ионизирующих излучений, сдавшие технический минимум по устройству стенда и принципу его работы, ознакомившиеся с настоящей методикой выполнения измерений.

## 3. Подготовка к выполнению измерений

При выполнении измерений следует соблюдать следующие условия:

- Температура воздуха в помещении 18–28 °С.
- Относительная влажность воздуха 30–80 %.
- Атмосферное давление 84–106,7 кПа.

Уровень фона по нейтронному излучению должен быть не более 80 нейтр./( $\text{м}^2 \text{ с}$ ) и по гамма-излучению не более 0,1 мкР/с.

Напряжение в сети  $220 \pm 10 \text{ В}$ .

---

<sup>1</sup> Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности. 78 с.

<sup>2</sup> Нормы радиационной безопасности. 116 с.

<sup>3</sup> Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. СПб.: Изд. ДЕАН, 2003. 304 с.



Проводят подготовку стенда к измерениям в соответствии с техническим описанием и инструкцией по эксплуатации.

Измерение эффективности регистрации нейтронов детектором (ДИН) проводят в широком пучке быстрых нейтронов от источника нейтронного излучения (ИНИ)<sup>252</sup>Cf с использованием методики экранирующего конуса (ЭК) в соответствии с ГОСТ 8.355<sup>1</sup>.

Нейтронный источник располагают так, чтобы его продольная ось симметрии была параллельна передней поверхности детектора.

Геометрические центры источника нейтронов, экранирующего конуса и детектора должны находиться на одной линии — линии визирования.

Неоднородность нейтронного поля по площади детектора в широком пучке не должна быть больше 5 %. (Это условие накладывает ограничение на минимальную дальность! Легко оценить из простых геометрических соотношений, что минимальная дальность соответствует примерно 3,0 м.)

## 4. Выполнение измерений

1. После проведения подготовительных работ включают в сеть все средства измерений и вспомогательное оборудование, входящее в стенд, и прогревают их. Расстояние между геометрическими центрами ДИН и ИНИ устанавливают любое удобное по условиям зала в диапазоне 5—9 м. После выхода аппаратуры на рабочий режим приступают к измерениям.

2. Проверка стабильности работы детектора (стабильности параметра «эффективность регистрации нейтронов»).

Определение стабильности работы детектора проводят с целью проверки на отсутствие недопустимых при нормальной ра-

---

<sup>1</sup> ГОСТ 8.355—79 Радиометры нейтронов. Методы и средства поверки. М., 1979. 26 с.

боте детектора выбросов, которые могут создаваться вследствие утечек или пробоев в высоковольтной части детектора либо иными дефектами в электрической схеме детектора. Указанная проверка осуществляется в следующей последовательности:

2.1. Экранирующий конус удаляют с линии визирования ДИН — ИНИ. Устанавливают с помощью ПО начальные условия измерений: длительность серии измерений  $t_c \geq 1000$  с, количество серий не менее 10. Измерения выполняют в течение 8 ч.

2.2. При выбранном расстоянии  $R_i$  проводится измерение суммарного счета  $N_i$  и скорости счета  $n_i$  от детектора ДИН в десяти сериях при заданной длительности серии ( $N_i = n_i t_c$ ).

2.3. Определяется среднее значение скорости счета:

$$\bar{n} = \frac{1}{10} \cdot \sum_{i=1}^{10} n_i. \quad (6.1)$$

2.4. Вычисляется максимальное отклонение скорости счета от среднего значения, характеризующее искомую стабильность работы детектора:

$$\Delta_{\text{эф}} = \left| \frac{\bar{n} - n_m}{\bar{n}} \right| \cdot 100\%, \quad (6.2)$$

где  $n_m$  — максимальное или минимальное значение  $n_i$  (расчет по (6.2) проводится и для максимального, и для минимального значения  $n_i$ ). Результат проверки стабильности работы детектора считается положительным, если выполняется условие:

$$\Delta_{\text{эф}} \leq 1,5\%. \quad (6.3)$$

Примечания:

- Неравенство (6.3) решают для наибольшего значения  $\Delta_{\text{эф}}$  из вычисленных по формуле (6.1).
- Проверку детектора проводят при неизменном положении оборудования и персонала во время измерений.

3. Выполнение измерений для определения основной характеристики детектора ДИН — эффективности регистрации нейтронов.

Измерения по настоящему пункту проводят для трех значений расстояний между геометрическими центрами ДИН и ИНИ:  $R_1 = 5$  м,  $R_2 = 6$  м,  $R_3 = 7$  м. При установке ИНИ допустимы отклонения указанных расстояний в пределах  $\pm 0,3$  м, однако погрешность измерения расстояний не должна превышать 0,5 %.

3.1. Экранирующий конус удаляют с линии визирования ДИН — ИНИ. Устанавливают с помощью ПО начальные условия измерений: длительность серии измерений  $t_c \geq 500$  с, количество серий — 3.

Примечание: длительность серии может быть выбрана меньше 500 с, однако должно соблюдаться условие: суммарный счет от детектора за время  $t_c$  должен быть не ниже чем 40000.

3.2. При расстоянии  $R_1$  проводится измерение суммарного счета  $N_{1i}$  и скорости счета от детектора  $n_{1i}$  в трех сериях при заданной длительности серии. Результаты измерений сохраняются в соответствующем файле (см. руководство оператора).

3.3. Экранирующий конус устанавливается на линию визирования ДИН — ИНИ.

3.4. При тех же условиях, что и в п. 3.1, проводятся три серии измерений, аналогичных описанным. В результате получают скорости счета фона  $b_{2i}$  в соответствующем файле.

3.5. При расстояниях  $R_2 = 6$  м,  $R_3 = 7$  м повторяют измерения в последовательности, описанной в пп. 3.1–3.4. В результате этих измерений получают значения скоростей счета сигнала плюс фона  $n_{2i}$ ,  $n_{3i}$  и скоростей счета фона  $b_{2i}$ ,  $b_{3i}$ , соответствующие расстояниям  $R_2$ ,  $R_3$ .

## 5. Обработка результатов измерений

Вычисляют значения плотности потока нейтронов, падающих на детектор с расстояний от источника нейтронов  $^{252}\text{Cf}$ , равных  $R_j$  (конкретные значения расстояний  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  получены при проведении измерений с точностью не хуже 0,5 %).

Значение плотности потока нейтронного излучения  $\Phi_j$  на расстоянии  $R_j$  от источника с выходом (полным потоком в  $4\pi$ ) нейтронов  $Q$ , указанным в паспорте на источник, для случая открытой геометрии в воздухе, согласно закону обратных квадратов, определяют по формуле:

$$\Phi_j = \frac{K(\vartheta) \cdot K_t \cdot e^{\mu R} \cdot Q}{4\pi(R_j + R_{\text{эфф}})^2}, \quad (6.4)$$

где  $K_t = \exp(-0,693 \cdot t/T_{1/2})$

$T_{1/2}$  — период полураспада изотопа  $^{252}\text{Cf}$ ;

$t$  — время, прошедшее с момента последней аттестации источника;

$\mu$  — коэффициент ослабления потока нейтронов в воздухе (для источника  $^{252}\text{Cf}$   $\mu = 0,81 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1}$ );

$R_{\text{эфф}}$  — расстояние до эффективного центра детектора;

$K(\vartheta)$  — коэффициент асимметрии нейтронного излучения от  $^{252}\text{Cf}$  (обычно принимают  $K(\vartheta) = 1$ ; см. протокол метрологической аттестации стенда).

Примечание: расстояние до эффективного центра детектора  $R_{\text{эфф}}$  берется из протокола метрологической аттестации или последней проверки стенда в случае, если конструктивные размеры аттестуемого детектора совпадают с таковыми для МРДИ-01. В противном случае значение  $R_{\text{эфф}}$  определяется в соответствии с ГОСТ 8.355–79. Для определения значения  $R_{\text{эфф}}$  измерения в п. 3 выше проводятся не в трех, а в пяти или более точках по расстояниям  $R_j$ . По полученным результатам измерений строится график зависимости  $1/\sqrt{\overline{n_j} - \overline{b_j}}$  от  $R_j$  (обозначения расшифрованы ниже). Через нанесенные точки проводится прямая до пересечения с осью абсцисс; точка пересечения с осью абсцисс покажет значение  $R_{\text{эфф}}$ .

2. Эффективность регистрации нейтронов детектором нейтронов рассчитывают для каждого значения расстояния  $R_{\text{эфф}}$  по формуле:

$$\mathcal{E}\Phi_j = \frac{\bar{n}_j - \bar{b}_j}{\Phi_j} \text{ м}^2/\text{нейтр.},$$

где  $\Phi_j$  — значения плотности потока нейтронов из формулы (6.4);  
 $\bar{n}_j$  — средние арифметические значения скорости счета сигнала плюс фона, вычисленные из результатов измерений для каждого  $j$ -го расстояния;

$\bar{b}_j$  — средние арифметические значения скорости счета фона, вычисленные из результатов измерений для каждого  $j$ -го расстояния.

3. За результат измерения эффективности регистрации нейтронов детектором принимается среднее арифметическое значение из трех результатов измерения:

$$\overline{\mathcal{E}\Phi} = \frac{1}{J} \cdot \sum_{j=1}^J \mathcal{E}\Phi_j, \text{ м}^2/\text{нейтр.}$$

Расхождение между максимальным и минимальным значениями  $\mathcal{E}\Phi_j$ , равное:

$$\delta = \frac{\mathcal{E}\Phi_{\max} - \mathcal{E}\Phi_{\min}}{\overline{\mathcal{E}\Phi}} \cdot 100\%,$$

не должно превосходить значения норматива оперативного контроля сходимости  $d_1 = 5\%$ .

4. Результат измерений представляют в виде:

$$\overline{\mathcal{E}\Phi}, \text{ м}^2/\text{нейтр.}; \delta, \%, P=0,95,$$

или

$$\overline{\mathcal{E}\Phi} \pm \Delta, \text{ м}^2/\text{нейтр.}; P=0,95,$$

где  $\Delta = \delta \cdot \overline{\mathcal{E}\Phi} / 100, \text{ м}^2/\text{нейтр.}$

Значение относительной погрешности измерения эффективности регистрации нейтронов детектором  $\delta$  берется из результатов аттестации (или последней поверки) стенда. Результат

измерений должен оканчиваться тем же десятичным разрядом, что и погрешность. Результаты измерений оформляются записью в журнале. Результаты измерений удостоверяются лицом, проводившим измерение, а при необходимости — руководителем организации (предприятия).

## 6. Контроль инструментальной погрешности измерений на стенде

Контроль инструментальной погрешности измерений на стенде проводят с использованием генератора импульсов типа Г5—54, работающего в режиме внешнего запуска, и частотомера типа ЧЗ—34. Импульсы синхронизации подают на генератор с частотомера.

Частота следования импульсов, задаваемых частотомером ЧЗ—34, должна быть близкой к частоте импульсов, измеренных при определении эффективности регистрации нейтронов детектором.

Импульсы с генератора подают на вход контроллера (блока сопряжения) стенда. Амплитуда импульсов должна быть в 1,5 раза больше нижней границы амплитуд импульсов, регистрируемых стендом.

Выполняют измерения числа импульсов, поступающих с генератора, в течение 500 с. Такие измерения повторяют три раза.

Минимальное и максимальное значения скорости счета зарегистрированных на стенде импульсов не должны отличаться друг от друга на величину большую, чем допускаемое расхождение  $d_2$ , характеризующее сходимость измерений (значение  $d_2$  устанавливается равным 0,5 %).

При превышении норматива оперативного контроля сходимости измерения повторяют. При повторном превышении указанного норматива  $d_2$  выясняют причины, приводящие к неудовлетворительным результатам контроля, и устраняют их.

Оперативный контроль сходимости измерений выполняют при испытаниях каждого блока детекторов нейтронов.

В случае удовлетворительного выполнения условия оперативного контроля сходимости измерений скорости счета импульсов выполняют контроль погрешности измерений. Для этого рассчитывают среднее арифметическое значение по трем измерениям скорости счета импульсов  $\bar{n}$  и вычисляют разность между  $\bar{n}$  и  $n_{\text{ч}}$  (калиброванной частотой повторения импульсов, задаваемой с тактового выхода частотомера), т. е.  $\Delta_{\text{и}} = \bar{n} - n_{\text{ч}}$ .

Полученное значение разности не должно превышать норматива (значения) погрешности при измерении скорости счета импульсов, указанного в свидетельстве о метрологической аттестации стенда. При превышении норматива погрешности измерения повторяют. При повторном превышении указанного норматива выясняют причины и устраняют их.

## Содержание отчета

Студенты представляют по проделанной лабораторной работе краткий аннотированный отчет (один на бригаду), который должен в сжатой форме содержать:

- название и цель работы;
- устройство и физические принципы работы детектора нейтронов (кратко);
- первичные результаты измерений основных технических характеристик (ОТХ) детектора нейтронов;
- результаты обработки первичных данных и результаты определения погрешности измерений;
- выводы по результатам измерений в соответствии с параграфом «Обработка результатов измерений».

---

# Оглавление

---

|  |    |
|--|----|
| УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ .....   | 3  |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. Алгоритмы поиска<br>и обнаружения источников ионизирующих излучений.....  | 5  |
| Введение .....   | 5  |
| 1. Теоретические основы разработки оптимальных<br>алгоритмов обнаружения.....  | 6  |
| 2. Основные термины и понятия, используемые<br>при создании алгоритмов обнаружения .....   | 9  |
| 3. Алгоритм обнаружения в режиме «Неподвижный».....  | 10 |
| 4. Алгоритм обнаружения в режиме «Подвижный» .....   | 15 |
| 5. Учет реальных характеристик флуктуаций фона<br>в алгоритмах обнаружения .....   | 21 |
| 6. Алгоритм «Поиск».....   | 29 |
| 7. Практическая часть лабораторной работы.....   | 32 |
| Коллоквиум по лабораторной работе № 1 .....  | 34 |
| Содержание отчета .....  | 35 |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. Измерения основных<br>характеристик счетчиков нейтронов ПД-631М.....  | 36 |
| Введение .....   | 36 |
| 1. Основные положения .....  | 37 |
| 2. Лабораторная установка .....  | 42 |
| 3. Порядок выполнения работы .....   | 45 |
| Содержание отчета.....   | 47 |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. Измерения основных<br>технических характеристик блоков детектирования<br>гамма-излучения сцинтилляционных спектрометрических<br>на установке «Спектр-1» ..... | 48 |



|   |           |
|---|-----------|
| Введение .....  | 48        |
| 1. Требования к показателям точности измерений .....  | 50        |
| 2. Метод измерений .....  | 51        |
| 3. Подготовка к проведению измерений.....   | 52        |
| 4. Выполнение измерений .....   | 54        |
| 5. Обработка результатов измерений .....  | 56        |
| 6. Оформление результатов измерений .....   | 60        |
| Содержание отчета.....  | 61        |
| <b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. Носимый радиационный<br/>монитор (НОРМ) .....</b>                               | <b>62</b> |
| Введение .....  | 62        |
| Описание и принцип работы прибора .....   | 63        |
| Порядок выполнения<br>лабораторной работы .....   | 74        |
| Содержание отчета.....  | 74        |
| <b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. Комплекс СРК «Соратник-01».</b>   |           |
| <b>Изучение устройства и особенностей эксплуатации.</b>   |           |
| <b>Решение задач обнаружения и идентификации ИИИ .....</b>  | <b>76</b> |
| Введение .....  | 76        |
| Порядок выполнения лабораторной работы .....  | 78        |
| Содержание отчета.....  | 79        |
| <b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6. Измерение основных<br/>технических характеристик детекторов нейтронов .....</b> | <b>81</b> |
| Введение .....  | 81        |
| 1. Средства измерений<br>и вспомогательные устройства .....   | 83        |
| 2. Требования безопасности .....  | 86        |
| 3. Подготовка к выполнению измерений .....  | 86        |
| 4. Выполнение измерений .....   | 87        |
| 5. Обработка результатов измерений .....  | 89        |
| 6. Контроль инструментальной<br>погрешности измерений на стенде.....  | 92        |
| Содержание отчета.....  | 93        |

*Учебное издание*

**Петров Владимир Леонидович**

## **МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕЛЯЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ**

**Редактор В. О. Корионова  
Верстка Е. В. Ровнушкиной**

Подписано в печать 30.04.2019. Формат 60×84 1/16.  
Бумага писчая. Цифровая печать. Усл. печ. л. 5,6.  
Уч.-изд. л. 4,2. Тираж 70 экз. Заказ 173.

Издательство Уральского университета  
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ  
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5  
Тел.: 8 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41  
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ  
620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4  
Тел.: 8 (343) 358-93-06, 350-58-20, 350-90-13  
Факс: 8 (343) 358-93-06  
<http://print.urfu.ru>



